



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
2010

**VERÓNICA SOFIA
FERREIRA ANTUNES**

**RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE SECÇÕES
SÍSMICAS EM SISTEMAS EXTENSIONAIS**



**VERÓNICA SOFIA
FERREIRA ANTUNES**

**RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE SECÇÕES
SÍSMICAS EM SISTEMAS EXTENSIONAIS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Menezes Pinheiro, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e da Doutora Beatriz Valle Aguado, Professora Associada do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me ajudaram ao longo da sua execução.

o júri

presidente

Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina
Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Jorge Madeira Coke
Professor Auxiliar da Escola de Ciências da Vida e do Ambiente da Universidade de Trás os Montes e Alto Douro

Prof. Doutora Beatriz Valle Aguado
Professora Associada do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Filipe Fuentefria Menezes Pinheiro
Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Este trabalho deve a sua existência a muitas pessoas. Em primeiro lugar, queria agradecer à minha mãe e às minhas irmãs pelo apoio incondicional que sempre me deram.

Ao Professor Luís Menezes e à Professora Beatriz Aguado, por todo o acompanhamento, apoio, conselhos, orientação e disponibilidade a que sempre se dispuseram ao longo da realização deste trabalho.

A todos os professores que me acompanharam ao longo da vida, que directa ou indirectamente contribuíram para o meu sucesso escolar ao longo destes anos.

À Dona Graça, não só pelo seu contributo na impressão deste trabalho, como também pela sua disponibilidade, apoio e carinho com que sempre me recebeu e a todos os funcionários do Departamento de Geociências, pela sua constante disponibilidade e simpatia.

Aos meus “amigos de toda a vida”, que sempre estiveram lá.

Ao pessoal do ASIG, pelo fantástico grupo de amigos que criámos e que, longe ou perto, sempre está lá para apoiar quem precise.

A todas as minhas colegas de quarto, especialmente às duas últimas, à Glória e Vânia que, desde há dois anos, têm-me dado todo o apoio, ajuda, paciência, compreensão e por serem muitas vezes o meu “despertador”.

Aos meus amigos de Aveiro, pelo apoio prestado e por todas aquelas vezes me animaram e me fizeram seguir em frente.

Ao Michael pelas inúmeras vezes que me ajudou ao longo deste trabalho e por toda a disponibilidade e paciência para me “aturar”.

palavras-chave

2DMove, restauração, modelação, sistemas extensionais, reconstrução, backstripping, descompactação, ajuste isostático, Airy, Mar de Beaufort, Delta do Mackenzie, sequência Eureka, secções sísmicas.

resumo

Neste trabalho analisam-se as potencialidades do software 2Dmove, da Midland Valley, para efectuar a restauração de secções sísmicas/geológicas e aplica-se este software à restauração de uma secção sísmica situada no Mar de Beaufort, no norte do Canadá. Descrevem-se as potencialidades deste software e são analisados, em detalhe, vários exemplos de aplicações a casos reais, incluídos no tutorial do programa. Esta análise permitiu, por um lado, obter informações importantes relativamente às várias metodologias de restauração e ao modo de utilização dos algoritmos, e por outro, demonstrar de que forma a aplicação deste software permite resolver situações geológicas complexas e obter resultados úteis sobre a evolução geológica de uma região ou sobre áreas de reservatórios de hidrocarbonetos.

Antes de se proceder à restauração da secção sísmica efectuou-se uma revisão bibliográfica sobre a área de estudo, de forma a conhecer mais pormenorizadamente a geologia regional e a evolução geodinâmica deste sector do Mar de Beaufort. Esta revisão permitiu correlacionar as unidades sísmo-estratigráficas identificadas na secção sísmica, com as unidades crono-estratigráficas referidas na literatura. A análise detalhada da geometria e do carácter dos reflectores em cada unidade sísmo-estratigráfica da secção sísmica, permitiu evidenciar as relações temporais entre a deposição das sequências e a movimentação das falhas, o que foi muito importante para a restauração utilizando o software. A utilização do 2DMove na restauração da secção em estudo possibilitou a reconstituição dos principais eventos tectono-sedimentares nesta zona, tendo em conta os efeitos de descompactação da secção após a remoção das camadas sobrejacentes e corrigindo os efeitos dos ajustes isostáticos. Os resultados obtidos, para além da identificação dos pulsos compressivos já conhecidos para a zona em estudo, sugerem ainda a existência de um possível pulso compressivo adicional no Oligocénico inferior, não referido na literatura. São necessários mais estudos para confirmar ou não esta possibilidade.

keywords

2DMove, restoration, modelation, extencional systems, reconstruction, backstripping, decompaction, isostatic adjustments, Airy, Beaufort Sea, Mackenzie Delta, Eureka sequence, cross sections.

abstract

This work analyses the potential of the software 2Dmove, from Midland Valley, to carry out restoration of geological and seismic sections. This software is then applied to the restoration of a seismic section from the Beaufort Sea, in northern Canada. The different tools and procedures available in this software are described in detail and several application case studies, included in the tutorial, are analyzed in detail. This analysis allowed obtaining important information concerning the various methodologies for restoration and how to use the various algorithms available in the software, but it also showed how it allows tackling complex geological situations and getting useful results for hydrocarbon reservoir prediction.

A bibliographical review of the geology and geodynamical evolution of the Canadian Margin of the Beaufort Sea allowed a much better understanding of the processes involved in the study area and proved essential to the restoration of the seismic section. It also allowed establishing a correlation between the seismic stratigraphic units identified on the seismic section with the chronostratigraphic units established in the literature. The detailed analysis of the geometry and character of the seismic reflections within the seismic stratigraphic units allowed the identification of the temporal relationships between the deposition of the sedimentary units and the movement in the faults. The application of the 2DMove in the restoration of the seismic section allowed reconstructing the main tectono-sedimentary events, taking into account the decompaction of the geological section after the removal of the overlying layers and correcting for the associated isostatic adjustments. The results obtained, not only confirmed the occurrence of the compressive pulses known from the literature but also suggest the existence of a possible additional compressional pulse in the Lower Oligocene, not previously identified. Further studies are necessary to confirm this possibility.

Índice

Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. NATUREZA E ÂMBITO DO TRABALHO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	1
1.3. METODOLOGIA	1
1.4. DADOS UTILIZADOS	2
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
Capítulo 2. O programa 2DMove	5
2.1. POTENCIALIDADES E VANTAGENS DE UTILIZAÇÃO	5
2.1.1. Modelação estrutural: restauração e modelação para a actualidade	6
2.1.2. Balanceamento.....	7
2.1.3. Balanceamento aplicado à restauração	9
2.1.4. Restauração em Puzzle.....	9
2.1.5. Restauração com base em secções sísmicas	10
2.2. CONVERSÃO EM PROFUNDIDADE	13
2.2.1. Método utilizando a velocidade num horizonte, a uma determinada profundidade.....	13
2.2.2. Método utilizando a velocidade num material à superfície (v_0).....	14
2.2.3. Funções para a conversão em profundidade	14
2.3. DESCOMPACTAÇÃO.....	16
2.3.1. Compactação e Descompactação	17
2.3.2. Efeitos Isostáticos.....	21
2.3.3. Historial de compactação.....	23
2.4. ALGORITMOS DE RESTAURAÇÃO.....	23
2.4.1. Flexural Slip Unfold.....	24
2.4.2. Restore	26
2.4.3. Inclined Shear.....	31
2.4.4. Fault Parallel Flow	34
2.5. CONSTRUÇÃO DE CAMADAS	38

Capítulo 3. Alguns exemplos de aplicação do 2DMove	43
3.1. SEQUÊNCIA DELTAICA PROGRADANTE	43
3.1.1. Importação da secção no programa 2DMove	43
3.1.2. Interpretação e construção da secção.....	44
3.1.3. Restauração da secção.....	46
3.1.4. Delimitação de um potencial reservatório.....	51
3.1.5. Modelação para a geometria actual	52
3.1.6. Comentários finais	55
3.2. ESTRUTURA DE <i>ROLLOVER</i> NO LOUISIANA	55
3.2.1. Importação da secção sísmica e dimensionamento da imagem.....	57
3.2.2. Construção da secção.....	59
3.2.3. Conversão em profundidade	62
3.2.4. Backstripping da secção	63
3.2.5. Comentários finais	68
3.3. RESTAURAÇÃO DE UMA SECÇÃO COM SAL	69
3.3.1. Importação de um mapa no 2DMove	70
3.3.2. Associação de uma secção sísmica a um mapa	71
3.3.3. Construção da secção sísmica.....	73
3.3.4. Base de dados	75
3.3.5. Recomendações e informações adicionais	76
3.3.6. Conversão da secção para profundidade	78
3.3.7. Restauração da camada do Mio-Pliocénico	79
3.3.8. Restauração da camada do Miocénico	82
3.3.9. <i>Restauração</i> da camada do Oligocénico	86
3.3.10. <i>Descompactação</i> do pré-Oligocénico	95
3.3.11. Comentários finais.....	96
Capítulo 4. Estudo de uma secção sísmica situada na margem Norte do Canadá.....	99
4.1. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	99
4.1.1. Domínios estruturais	100
4.1.2. Estratigrafia da Bacia do Mar de Beaufort.....	102
4.1.3. Evolução Tectónica da Bacia Ártica do Canadá	105
4.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA SECÇÃO SÍSMICA	110
4.2.1. Localização da secção sísmica	110

4.2.2.	Descrição da secção	112
4.2.3.	Estratigrafia	112
4.3.	INTERPRETAÇÃO DA SECÇÃO SÍSMICA	114
4.3.1.	Deposição da sequência 1.....	114
4.3.2.	Deposição da sequência 2.....	117
4.3.3.	Deposição da sequência 3.....	118
4.3.4.	Deposição da sequência 4.....	121
4.4.	PREPARAÇÃO DA SECÇÃO SÍSMICA NO 2DMOVE	123
4.4.1.	Introdução do mapa no 2DMove	124
4.4.2.	Associação da secção sísmica ao mapa	124
4.4.3.	Construção da secção	125
4.4.4.	Construção de uma base de dados adequada.....	126
4.4.5.	Conversão em profundidade.....	128
4.5.	RESTAURAÇÃO DA SECÇÃO SÍSMICA	129
4.5.1.	Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência pós-Eurekana	130
4.5.2.	Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 4.....	131
4.5.3.	Restauração da sequência 3	131
4.5.4.	Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 3.....	134
4.5.5.	Restauração da sequência 2	134
4.5.6.	Restauração da secção: Cenário 1	136
4.5.7.	Restauração da secção: Cenário 2.....	139
4.6.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	143
Capítulo 5.	Conclusões	145
Referências Bibliográficas	147	
Anexo 1	I	

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema ilustrativo da metodologia de trabalho de uma <i>restauração</i> (à esquerda) e de uma modelação até à actualidade (à direita).....	7
Figura 2.2 – Alterações na acomodação do deslocamento da falha; a) propagação da falha por dobramento; b) divisão do deslocamento (falhas imbricadas).	8
Figura 2.3 – Esquema ilustrativo da informação que pode ser retirada a partir de uma <i>restauração</i> em puzzle.....	10
Figura 2.4 – Caixa de ferramentas da conversão em profundidade.	16
Figura 2.5 – Caixa de ferramentas da <i>descompactação</i>	17
Figura 2.6 – <i>Descompactação</i> de camadas com litologias diferentes, utilizando uma largura de filtro de zero; a) antes da <i>descompactação</i> ; b) após a <i>descompactação</i>	19
Figura 2.7 – <i>Descompactação</i> de camadas com litologias diferentes; a) antes da <i>descompactação</i> ; b) <i>descompactação</i> realizada, após se inserir um filtro.	20
Figura 2.8 - Modelo isostático de <i>Airy</i> , onde D1 é a profundidade da água antes da carga de sedimento e D2 é a profundidade da água depois da carga do sedimento. As restantes variáveis encontram-se definidas posteriormente, no texto.....	22
Figura 2.9 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo de <i>restauração</i> ; a) dobra a ser desdobrada, com as variações de espessura; b) o sistema de deslizamento é construído paralelamente à camada <i>modelo</i> , utilizando os bissectores de deslizamento dominantes (a vermelho). As intersecções entre o sistema de deslizamento e as camadas passivas mantêm a espessura; c) a camada <i>modelo</i> e as camadas passivas são desdobradas à volta do <i>pin</i> (seta a vermelho).	25
Figura 2.10 – Caixa de ferramentas do <i>Flexural Slip Unfold</i>	26
Figura 2.11 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo <i>Restore</i> ; a) <i>restauração</i> da linha <i>modelo</i> (a azul), para um datum horizontal (verde); b) geometria restaurada dos horizontes superior e inferior.	27
Figura 2.12 – Caixa de ferramentas do algoritmo <i>Restore</i>	28
Figura 2.13 - Esquema de <i>restauração</i> através de uma dobra do tecto de uma falha, utilizando um vector de cisalhamento vertical (90°); a) antes da <i>restauração</i> ; b) após a <i>restauração</i>	29
Figura 2.14 – Esquema de <i>restauração</i> de uma dobra do tecto de uma falha, utilizando um vector de cisalhamento inclinado (45°); a) antes da <i>restauração</i> ; b) após a <i>restauração</i>	30

Figura 2.15 - <i>Restauração</i> até uma linha <i>alvo</i> (a preto) utilizando o cisalhamento vertical; a) 0% da <i>restauração</i> ; b) 50% da <i>restauração</i> ; c) 100% da <i>restauração</i> . As linhas pretas verticais representam os postes.	30
Figura 2.16 - Linha <i>alvo</i> estendida à esquerda e à direita.	30
Figura 2.17 - <i>Restauração</i> utilizando o cisalhamento vertical de modo a deslocar as linhas modelo a uma linha <i>alvo</i> ; a) 0% da <i>restauração</i> ; b) 50% <i>restauração</i> ; c) 100% da <i>restauração</i> . As linhas pretas verticais representam os postes.	31
Figura 2.18 – Linha <i>alvo</i> estendida à esquerda e à direita.....	31
Figura 2.19 - Esquema representativo do funcionamento do algoritmo <i>Inclined Shear</i> ; a) estado inicial mostrando o montante a ser estendido; b) a extensão cria um vazio entre os blocos do tecto e do muro da falha, onde a área do vazio é equivalente à área de extensão; c) o vector de cisalhamento especifica o caminho dos elementos do tecto da falha durante o colapso, removendo o espaço vazio (neste exemplo, o vector é orientado antiteticamente ao plano de falha).....	32
Figura 2.20 – Caixa de ferramentas do <i>Inclined Shear</i>	33
Figura 2.21 – Definição do ângulo do vector de cisalhamento (dependendo do ângulo inserido, o vector terá diferentes posições); a) o vector de cisalhamento é orientado como uma média das falhas sintética e antitética em relação ao deslocamento principal; b) o vector de cisalhamento é paralelo ao plano axial do anticlinal de rollover.	34
Figura 2.22 – Esquema ilustrativo da relação entre a geometria da falha, os bissectores de inclinação e as linhas de fluxo do tecto da falha no algoritmo <i>Fault Parallel Flow</i>	35
Figura 2.23 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo <i>Fault Parallel Flow</i> ; a) antes de ser aplicado o algoritmo; b) com as linhas de fluxo (a preto) e os bissectores (a vermelho) que serão utilizados pelo algoritmo na <i>restauração</i> ; c) secção restaurada.	36
Figura 2.24 – Caixa de ferramentas do <i>Fault Parallel Flow</i>	37
Figura 2.25 – Esquema que representa a convenção de sinal para o cisalhamento angular.	37
Figura 2.26 – Esquema ilustrativo de uma dobra provocada por uma falha, modelada para a actualidade utilizando o <i>Fault Parallel Flow</i> ; a) modelação utilizando um valor de cisalhamento angular de 0; b) modelação com a quantidade de cisalhamento angular necessária, de modo a eliminar o estreitamento nas camadas existentes no tecto da falha.	38
Figura 2.27 – Esquema representativo do modo de funcionamento da função de construção de camadas. A espessura e os ângulos das novas camadas encontram-se à esquerda da imagem.....	38
Figura 2.28 – Esquema representativo de construção de camadas utilizando um determinado ângulo; a) construção da primeira camada; b) construção da segunda camada; c) construção de uma terceira camada. Na zona de intersecção das diferentes	

camadas criadas, é utilizada uma combinação dos bissectores das diferentes camadas.	39
Figura 2.29 – Espessura (h) de uma camada.	39
Figura 2.30 – Diferença entre espessura ao longo de um bissector (h2) e espessura da camada (h1).	40
Figura 2.31 – Camada com espessura variável. A espessura h1 medida a partir do topo da unidade azul é distinta da espessura h2, medida a partir do topo da unidade a preto.	40
Figura 2.32 – O ponto de intersecção entre uma determinada espessura num ponto e um bissector (a vermelho) corresponde à espessura máxima (h) que pode ser definida acima desse ponto.	40
Figura 2.33 – Caixa de ferramentas de construção de camadas.	41
Figura 3.1 – Mapa com a secção inserida na vertical.	44
Figura 3.2 – Secção sísmica inserida no 2DMove, sem interpretação.	44
Figura 3.3 - Secção interpretada no 2Dmove.	45
Figura 3.4 - Dados interpretados, secção construída e pronta para a manipulação.	46
Figura 3.5 - Bloco seleccionado e pronto a ser movido. O muro da falha deverá ser movido ao longo da falha, de modo a juntar os dois horizontes correspondentes ao topo da sequência 2.	47
Figura 3.6 - Primeiro passo da <i>restauração</i> após a movimentação do bloco da direita.	47
Figura 3.7- Segundo passo da <i>restauração</i> , após a remoção da inclinação do bloco.	48
Figura 3.8 – Terceiro passo na <i>restauração</i>	49
Figura 3.9 – Quarto passo na <i>restauração</i>	49
Figura 3.10 – Quinto passo na <i>restauração</i>	50
Figura 3.11 – Modelo final restaurado.	50
Figura 3.12 – Interpretação da assinatura sísmico-estratigráfica, onde se observa claramente uma sequência prográdante. As linhas azuis correspondem aos reflectores mais fortes.	51
Figura 3.13 - Reservatório de areias definido na secção restaurada e respectivo modelo deposicional. As linhas vermelhas representam os limites do potencial reservatório.	52
Figura 3.14 – Secção sísmica após ter sido efectuado o deslocamento da falha da esquerda (primeiro passo na modelação da secção).	53
Figura 3.15 – Segundo passo da <i>modelação</i>	53
Figura 3.16 - Terceiro passo da <i>modelação</i>	54
Figura 3.17 – Quarto passo da <i>modelação</i>	54
Figura 3.18 – Quinto passo da <i>modelação</i> . Modelo com a actual inclinação das sequências.	55

Figura 3.19 – Modelo deposicional interpretado e modelado até à geometria actual.....	55
Figura 3.20 – Secção sísmica em estudo com interpretação sobreposta. Esta interpretação foi realizada por Xiao e Suppe (1992).....	56
Figura 3.21 – Esquema geral do perfil e das suas principais características.	57
Figura 3.22 – Imagem introduzida ao programa, sem o devido dimensionamento vertical.	58
Figura 3.23 – Escalas verticais (do 0 aos 3500 segundos); a) imagem por dimensionar (a escala lateral do programa não se encontra coincidente com a escala vertical da imagem); b) imagem com a escala vertical devidamente dimensionada.	58
Figura 3.24 – Interpretação das linhas desenhadas sobre a secção, que se encontram estendidas/finalizadas correctamente e com o devido redimensionamento dos nós.	60
Figura 3.25 – Polígonos criados automaticamente. No muro da falha, as unidades não ficaram bem definidas.	61
Figura 3.26 – Polígonos criados automaticamente após algumas revisões nas linhas. Como se pode observar, ainda existem dois polígonos que não se encontram construídos.....	61
Figura 3.27– Secção com os polígonos criados.	62
Figura 3.28 – Secção convertida para profundidade. A escala vertical da secção encontra-se agora em profundidade (metros).....	63
Figura 3.29 – Secção descompactada. A camada superficial é removida e os efeitos provocados por esta <i>descompactação</i> podem ser visualizados nas camadas subjacentes.	64
Figura 3.30 – Opção utilizando um ponto inicial e um ponto final que definam a quantidade de movimento necessária à <i>restauração</i> da camada.	65
Figura 3.31 – <i>Restauração</i> da unidade 1 (a amarelo).....	66
Figura 3.32 – Secção com a unidade 1 descompactada. A camada é removida e os efeitos provocados por esta descompactação podem ser visualizados nas camadas subjacentes.	66
Figura 3.33 – Secção após a restauração da unidade 2 (a laranja).....	67
Figura 3.34 – Secção descompactada. A unidade 2 (a laranja) é removida e os efeitos provocados por esta descompactação podem ser visualizados nas camadas subjacentes.	67
Figura 3.35 – Secção após a restauração da unidade 3 (a azul claro).	68
Figura 3.36 – Restauração do horizonte 3, com toda a informação existente.	68
Figura 3.37 – Diagrama de fluxo com as operações principais realizadas neste exemplo.	69
Figura 3.38 – Secção em estudo já com a devida interpretação. Na figura encontra-se destacada a descontinuidade estratigráfica existente, com uma linha a preto.....	70

Figura 3.39 – Mapa base dimensionado e com o traço de secção inserido ao longo da linha “C” (a vermelho).	71
Figura 3.40 – Mapa base e traço de secção na nova janela. O traço de secção da nova janela corresponde ao traço desenhado no mapa ao longo da linha “C”.....	72
Figura 3.41 – Imagem da secção sísmica com os dois pontos que serão utilizados no seu dimensionamento vertical.	73
Figura 3.42 – Dimensionamento vertical da imagem da secção sísmica; a) imagem inserida ao programa sem dimensionamento; b) imagem devidamente dimensionada, de acordo com a escala lateral do programa (em milissegundos).....	73
Figura 3.43 - Secção C correctamente construída.	74
Figura 3.44 - Secção C após terem sido criados os polígonos.....	74
Figura 3.45 – Secção em estudo com as principais unidades estratigráficas identificadas e tabela com as idades dos horizontes que as delimitam.	76
Figura 3.46 – Secção convertida para profundidade (metros).....	78
Figura 3.47 – Secção descompactada, após se remover a unidade do Pliocénico. Podem-se observar os efeitos provocados por esta unidade, nas camadas subjacentes.....	80
Figura 3.48 - Secção com a linha paleo-batimétrica (a branco) que será utilizada na restauração.....	81
Figura 3.49 - Secção após se aplicar o algoritmo <i>Flexural Slip Unfolding</i> com a posição do <i>pin</i> (seta vermelha à direita da imagem).	82
Figura 3.50 – Secção sísmica descompactada. A unidade do Mio-Pliocénico foi removida e é possível observar o efeito desta remoção, nas restantes camadas.....	83
Figura 3.51 – Secção obtida após a realização de uma <i>transformação</i> vertical na imagem, de modo a aplicar o levantamento isostático.	84
Figura 3.52 – Secção com o topo da unidade laranja redesenhado e com o <i>datum</i> regional (linha a vermelho) inserido na secção. O <i>pin</i> utilizado corresponde ao local da secção considerado como não deformada.....	85
Figura 3.53 – Unidade laranja (Miocénico) restaurada a um <i>datum</i> regional.....	86
Figura 3.54 – <i>Descompactação</i> da secção, provocada pela unidade laranja (Miocénico) e sem o ajuste isostático.....	87
Figura 3.55 – Secção ajustada isostaticamente, após a <i>descompactação</i>	87
Figura 3.56 – Aspecto da secção após terem sido removidos os polígonos cortados pelo fundo do mar, nesta etapa da <i>restauração</i>	88
Figura 3.57 – Construção de um horizonte erodido.....	88
Figura 3.58 – Horizonte do topo da camada azul (Cretácico-Paleocénico) construído.....	89
Figura 3.59 – Horizonte do topo da camada roxa (Eocénico) construído.	90
Figura 3.60 - Horizonte do topo da camada verde (Oligocénico) construído.	90

Figura 3.61 – Secção com as camadas erodidas completamente construídas.	90
Figura 3.62 – Secção com os blocos identificados.	91
Figura 3.63 – Selecção dos objectos que serão movidos na <i>restauração</i> da falha, situada entre os blocos 3 e 4.	92
Figura 3.64 – Blocos 4 e 5 restaurados relativamente ao bloco 3.	92
Figura 3.65– Bloco 5 restaurado relativamente ao bloco 4.	93
Figura 3.66 – Blocos 1 e 2 restaurados relativamente ao bloco 3.	93
Figura 3.67 – Bloco 1 restaurado relativamente ao bloco 2.	94
Figura 3.68 – Posição sugerida pelo tutorial para o <i>pin</i> (a vermelho) e para o <i>datum</i> (a branco).	94
Figura 3.69 – <i>Restauração</i> da unidade do Oligocénico (a verde) até ao <i>datum</i> regional.	95
Figura 3.70 – <i>Descompactação</i> da secção, provocada pela unidade verde.	95
Figura 3.71 – Ajuste isostático das camadas subjacentes à unidade verde (Oligocénico).	96
Figura 3.72 – Eocénico com as falhas restauradas.	96
Figura 4.1 – Localização geográfica do Mar de Beaufort (Morrell, 1995). Na figura pode-se observar a Península de Tuktoyaktuk, a Ilha de Richards e a Baía do Mackenzie.	99
Figura 4.2 – Localização geográfica dos domínios estruturais principais na região do Delta do Mackenzie e no Mar de Beaufort. As zonas a amarelo correspondem, da esquerda para a direita, à baía do Mackenzie, à ilha de Kendel e à Baía de Kugmalit (Dixon et al., 2005).	100
Figura 4.3 – Imagem com a delimitação das principais estruturas existentes no Delta do Rio Mackenzie e no Mar de Beaufort (Harris et al., 2004).	101
Figura 4.4 – Sequências estratigráficas no Mar de Beaufort e no Delta do Rio Mackenzie (Dixon et al., 2005).	103
Figura 4.5 – Coluna estratigráfica do Delta do Mackenzie – Mar de Beaufort (ConocoPhillips, 2004), com os principais episódios tectónicos (a verde estão representados os episódios de extensão e a vermelho os de compressão/transpressão).	106
Figura 4.6 – Geometria da margem continental do Mar de Beaufort (Lane, 2002). Esta margem extensional foi produzida pelo rift cuja tendência extensional é para Noroeste (seta a preto). As linhas a vermelho e a azul correspondem a perfis sísmicos.	107
Figura 4.7 – Secção sísmica situada em Parksons Lake, onde se observa claramente a principal discordância do Albiano, na zona de falha dos lagos Eskimo (Lane, 2002). A localização da secção está indicada na Figura 4.6.	108
Figura 4.8 – Principais tendências estruturais na zona do Mar de Beaufort e no Delta do Rio Mackenzie (Drummond, 2009). A amarelo estão representadas as estruturas do Quaternário e a lilás as estruturas mais antigas.	109

Figura 4.9 – Localização geográfica da linha sísmica em estudo (a vermelho; Hubbard et al., 1985).....	110
Figura 4.10 – Linha sísmica em estudo (Hubbard et al., 1985), com a identificação das sequências sismo-estratigráficas principais. Também se encontram identificados os diferentes blocos e respectivas falhas que os delimitam. Os números 1, 2, 3 e 4, correspondem às unidades principais da megasequência Eureka.	111
Figura 4.11 – Sequências sismo-estratigráficas principais da zona do Mar de Beaufort, segundo Hubbard et al. (1985), onde a cor azul representa as fácies do topo do Delta, a cor amarela as fácies da frente do delta e a cor laranja as fácies do pró-delta.	113
Figura 4.12 - Coluna crono-estratigráfica do Delta do Rio Mackenzie e do Mar de Beaufort, com informação relativa aos pulsos tectónicos principais (ConocoPhillips, 2004).	114
Figura 4.13- Interpretação de alguns reflectores da sequência 1 referentes ao bloco D, na interface da falha F_1	115
Figura 4.14 - Esquema geral da deposição da sequência 1 (a azul): a) Tempo t_0 : esquema do substrato pré-Eureka (verde-claro); b) tempo t_{1a} : deposição de parte da sequência. As três falhas estão inactivas; c) Tempo t_{1b} : continuação da sedimentação da sequência. A falha F_1 encontra-se activa e as falhas F_2 e F_3 permanecem inactivas.	116
Figura 4.15 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 2, no bloco D.	117
Figura 4.16 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 2 (a verde): a) tempo t_{1b} , anteriormente à sua deposição, mostrando apenas a sequência 1; b) tempo t_{2a} , mostrando a sedimentação de parte superior da sequência 2a; c) tempo t_{2b} , mostrando a movimentação progressiva da falha e a sedimentação da parte mais recente da sequência 2.	118
Figura 4.17 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco B.	119
Figura 4.18 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco C.	119
Figura 4.19 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco D.	120
Figura 4.20 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 3 (a laranja): a) antes da deposição desta sequência; b) no qual ocorreu deposição da sequência 3 e a movimentação das falhas; c) na continuação da deposição da sequência 3, após a falha F_3 ter cessado a sua actividade.	120
Figura 4.21 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco B.	121
Figura 4.22 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco C.	121
Figura 4.23 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 4, na base do bloco D.	122
Figura 4.24 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 4 (a amarelo); a) tempo t_3 : anterior à movimentação das falhas e à deposição da sequência 4.	122
Figura 4.25 – Mapa inserido no programa e devidamente dimensionado, com o traço de secção (correspondente à secção sísmica em estudo), desenhado a vermelho.	124

Figura 4.26 – Secção em tempo, com a respectiva interpretação inserida. A seta indica o sul.	125
Figura 4.27 – Secção sísmica construída (em tempo).....	126
Figura 4.28 – Localização do <i>pin</i> utilizado na construção da base de dados (secção em tempo).....	127
Figura 4.29 – Secção convertida em profundidade, com a escala vertical em metros... ..	129
Figura 4.30 – Secção descompactada (com a sequência pós-Eurekana removida) e com o devido ajuste isostático.	130
Figura 4.31 - Secção descompactada (com a sequência 4 removida) e com o devido ajuste isostático.....	131
Figura 4.32 – <i>Restauração</i> da falha F_1	132
Figura 4.33 – <i>Restauração</i> da falha F_2	132
Figura 4.34 - <i>Restauração</i> da falha F_3	133
Figura 4.35 – <i>Datum</i> (linha amarela) utilizado na <i>restauração</i> da sequência 3. A seta vermelha indica a localização do pin usado na <i>restauração</i>	133
Figura 4.36 - <i>Restauração</i> final da sequência 3.....	134
Figura 4.37 – Secção descompactada (com a sequência 3 removida) e ajustada isostaticamente.	134
Figura 4.38 – Secção sísmica com a falha F_1 restaurada.....	135
Figura 4.39 – Secção sísmica com a falha F_2 restaurada.....	135
Figura 4.40 – Secção sísmica com a falha F_3 restaurada.....	135
Figura 4.41 – Secção sísmica com o <i>datum</i> de <i>restauração</i> assumido anteriormente... ..	136
Figura 4.42 – Secção descompactada (com a sequência 2 removida), e ajustada isostaticamente (cenário 1).	137
Figura 4.43 – <i>Restauração</i> da falha F_1 (cenário 1).	137
Figura 4.44 – Secção sísmica com o <i>datum</i> inserido (linha amarela) e a partir do qual será restaurada a secção (cenário 1).	138
Figura 4.45 – Secção sísmica restaurada até ao <i>datum</i> criado (cenário 1).....	138
Figura 4.46 – Secção descompactada, com a sequência 1 removida e com o devido ajuste isostático (cenário 1).....	139
Figura 4.47 – Secção com o substrato pré-Eurekano restaurado (cenário 1).	139
Figura 4.48 – <i>Datum</i> e <i>pin</i> inseridos para a <i>restauração</i> da sequência 2.	140
Figura 4.49 – Secção com a sequência 2 restaurada até ao <i>datum</i> assumido (cenário 2).	140
Figura 4.50 – Secção descompactada e ajustada isostaticamente, após a remoção da sequência 2 (cenário 2).	140

Figura 4.51 – <i>Restauração</i> da falha F_1 (cenário 2).....	141
Figura 4.52 – Secção sísmica com o <i>datum</i> (linha amarela) para o qual será restaurada a secção (cenário 2).	141
Figura 4.53 – Secção sísmica restaurada até ao <i>datum</i> criado (cenário 2).	142
Figura 4.54 – Secção descompactada, com a sequência 1 removida e com o devido ajuste isostático.	142
Figura 4.55 – Secção com a sequência pré-Eurekana restaurada (cenário 2).	143

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Alguns parâmetros típicos de litologias do Mar do Norte (Sclater e Christie, 1980).	18
Tabela 2.2 – Alguns valores de porosidades de superfície típicos para várias litologias (Mauko et al., 1996).	18
Tabela 3.1 – Base de dados para a secção em estudo, com as respectivas propriedades. A velocidade corresponde à velocidade das ondas P ao atravessar a camada, em ms^{-1} ; o valor k é o coeficiente de variação da velocidade com a profundidade; o coeficiente c corresponde à variação da porosidade com a profundidade, em Km^{-1} ; a porosidade e a idade correspondem à porosidade e à idade (em Ma) de cada camada, respectivamente.	59
Tabela 3.2 – Base de dados para a secção em estudo com as suas respectivas propriedades. A velocidade encontra-se em metros por segundo (ms^{-1}); o valor k e o coeficiente c correspondem, respectivamente, à variação da velocidade (s^{-1}) e da porosidade com a profundidade (Km^{-1}); a porosidade é um parâmetro adimensional e, por último, a idade está apresentada em milhões de anos (Ma).	75
Tabela 4.1 – Valores médios das velocidades consideradas realistas, de propagação das ondas P para o topo de cada sequência sedimentar da secção.	127
Tabela 4.2 – Base de dados para a secção em estudo, com as respectivas propriedades: as colunas do horizonte e da cor representam os diferentes horizontes que constituem a secção e a sua respectiva cor; os parâmetros v_0 e k representam a velocidade de propagação das ondas sísmicas para cada sequência e a sua variação com a profundidade, parâmetros utilizados na conversão em profundidade; c e f_0 correspondem aos parâmetros usados pelo algoritmo da descompactação e correspondem à variação da porosidade com a profundidade e à porosidade inicial, respectivamente; por último, a espessura apresentada corresponde à espessura da secção, em metros por segundo (pois ainda não se efectuou a conversão em profundidade), no local do <i>pin</i> utilizado na obtenção da base de dados em questão.	128

Índice de Equações

Equação 2.1 – Equação para a conversão em profundidade.	13
Equação 2.2 - Equação para a conversão em profundidade caso o k seja 0.	14
Equação 2.3 – Profundidade na base da camada 1.....	14
Equação 2.4 – Velocidade do Horizonte.	14
Equação 2.5 – Profundidade na base da camada 2.....	14
Equação 2.6 – Função utilizada durante a compactação ou a <i>descompactação</i>	17
Equação 2.7 – Equação utilizada pelo filtro flexural.	20
Equação 2.8 – Reajuste isostático do modelo de <i>Airy</i>	23

Capítulo 1. Introdução

1.1. Natureza e âmbito do trabalho

O presente trabalho insere-se no âmbito da disciplina de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do curso de Mestrado em Engenharia Geológica (2º ciclo), segundo o modelo de Bolonha da Universidade de Aveiro.

O trabalho foi desenvolvido no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, sob a orientação científica do Prof. Doutor Luís Menezes Pinheiro e da Prof. Doutora Beatriz Valle Aguado.

Com este projecto pretendeu-se adquirir uma familiarização com o software 2D Move da Midland Valley de modo a executar *restaurações* estruturais e efectuar a sua aplicação a um caso real de uma linha sísmica na margem norte do Canadá, situada no Mar de Beaufort.

1.2. Objectivos

Os objectivos principais deste trabalho foram os seguintes:

- 1) Obter uma familiarização com o software Move.2009 da Midland Valley e ficar a conhecer as suas principais funcionalidades, potencialidades e domínios de aplicação no que respeita à sua aplicação a casos 2D. Este software permite a realização de reconstruções deposicionais e estruturais em perfis sísmicos, utilizando algoritmos de *restauração* ao longo de falhas. Inclui também algoritmos para conversão em profundidade, *descompactação*, construção de camadas e horizontes, entre outros.
- 2) Estudar detalhadamente os vários casos de aplicação deste software incluídos nos tutoriais e efectuar uma síntese dos procedimentos e resultados obtidos.
- 3) Efectuar a aplicação deste software à *restauração* de uma secção sísmica de um sistema extensional situado no Mar de Beaufort, na margem norte do Canadá.

1.3. Metodologia

Os estudos efectuados nas diferentes secções utilizaram uma metodologia típica de *restauração* das unidades estratigráficas (ou sequências sedimentares), que pressupõe a conversão da secção para profundidade, a eliminação do rejeito de falhas existentes,

a *restauração* das unidades a um *datum* (que poderá corresponder a uma paleo-batimetria, a um *datum* horizontal, etc.) e a *descompactação* das secções, após a eliminação das diferentes unidades. O conjunto da aplicação destes procedimentos é conhecido por *backstripping*.

O *backstripping* envolve a *restauração* das unidades presentes na secção e a *descompactação* da secção sísmica, provocada pela remoção das unidades superiores. A *descompactação* consiste na remoção da unidade mais superficial existente em cada passo da *restauração*, o que permite eliminar o efeito desta, nas camadas subjacentes. A *restauração* de uma unidade estratigráfica consiste, não só na eliminação do rejeito das falhas que afectam a unidade a restaurar, como também e caso necessário, na sua deslocação a um *datum* ou a uma paleo-batimetria conhecida, para que a unidade apresente a sua geometria inicial, isto é, a geometria que teria imediatamente após a deposição.

1.4. Dados utilizados

Nesta dissertação foram utilizados, na maioria dos casos de *restauração* apresentados, dados de secções sísmicas directamente fornecidas pelos tutoriais do software 2DMove da Midland Valley. Os exemplos do tutorial foram fundamentais, na medida em possibilitaram uma familiarização com o software, permitindo posteriormente a sua aplicação a um caso prático de estudo.

No caso em estudo, utilizou-se uma secção sísmica já interpretada, situada a norte do Canadá, para a qual se realizou a respectiva *restauração*. Esta secção foi extraída de Hubbard et al. (1985).

1.5. Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto por cinco capítulos.

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução que contém a natureza e o âmbito do trabalho, os objectivos, a metodologia utilizada, a fonte de dados dos diferentes casos de estudo efectuados e a descrição da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, introduz-se o software 2DMove, da Midland Valley. Começa-se por referir as potencialidades do programa e algumas das vantagens da sua utilização, na *restauração* de secções sísmicas. Seguidamente realiza-se uma análise detalhada dos principais algoritmos utilizados nas restaurações realizadas no presente trabalho. Dos algoritmos de *restauração* abordam-se o *Flexural Slip Unfold*, o *Restore* (algoritmos de *restauração* a um determinado *datum*), o *Inclined Shear* e o *Fault Parallel Flow* (algoritmos de *restauração* em falhas). Também se abordam outros algoritmos de igual

importância, tais como a *Descompactação*, a Conversão em Profundidade e a Construção de Camadas.

No terceiro capítulo, abordam-se três exemplos de estudo fornecidos pelo tutorial do programa. A importância destes exemplos reside no facto de fornecerem inúmeras informações no que toca à *restauração* de secções sísmicas, metodologias de *restauração*, utilização de algoritmos, principais aplicações e vantagens de utilização, ou seja, de um modo geral, os exemplos auxiliaram na compreensão do software. No primeiro exemplo, a realização da *restauração*, evidência uma estrutura progradante com areias de potencial reservatório, que nos dados originais da secção, simplesmente não se visualizava. No segundo exemplo, ao realizar-se o *backstripping* da secção até uma determinada unidade cortada por uma falha, com características de reservatório e com alguns dados adicionais, fornecidos pelo tutorial, é possível prever a existência de hidrocarbonetos na parte do reservatório situada no tecto da falha. No terceiro e último exemplo, é realizado o *backstripping* de uma secção afectada por tectónica salina.

No quarto capítulo, analisa-se a secção sísmica do caso prático em estudo, que se situa a Norte do Canadá, no Mar de Beaufort, junto ao Delta do rio Mackenzie. Em primeiro lugar, efectua-se o enquadramento geológico da zona em questão, onde se abordam as principais unidades existentes e um pouco da geo-história local. Seguidamente, é apresentada a localização geográfica e a descrição da secção sísmica e das litologias das principais sequências sedimentares existentes na secção, segundo Hubbard et al. (1985), e realiza-se a correlação com as sequências sedimentares apresentadas nas colunas estratigráficas existentes para a região. Efectua-se, depois, a interpretação estrutural da secção sísmica, onde se analisam os reflectores sísmicos de cada sequência, de modo identificar as relações temporais das falhas existentes com a deposição das sequências sedimentares. Por último, realiza-se a respectiva construção e *restauração* da secção sísmica, até restar apenas o soco da secção sísmica em estudo, ou seja, até ao estado anterior à deposição da megasequência existente na secção sísmica. Com este processo torna-se possível obter a quantidade de extensão ocorrida durante a deposição da megasequência em questão.

Finalmente, no quinto capítulo, discutem-se os resultados obtidos com a *restauração* da secção em estudo efectuada, propõe-se algumas medidas de melhoramento dos resultados e retiram-se as principais conclusões relativamente às capacidades do programa.

Parte da bibliografia indicada no final da dissertação, não foi directamente consultada e refere-se a citações indicadas no texto do tutorial do programa 2DMove, nomeadamente ao longo dos capítulos 2 e 3 desta dissertação.

Capítulo 2. O programa 2DMove

2.1. Potencialidades e vantagens de utilização

Os modelos geológicos tentam explicar uma realidade complexa, pelo que nem sempre se encontram completamente correctos. Por esta razão são necessárias técnicas de modelação que permitam testa-los e assim melhorar a compreensão dos sistemas geológicos e minimizar incertezas técnicas e riscos de perfuração. O melhor modo de aumentar a exactidão da previsão e da interpretação é utilizando a história estrutural e um modelo cinemático.

O programa Move, da Midland Valley, oferece uma gama completa de ferramentas de análise cinemática que permitem comparar cenários alternativos de modo a obter uma modelação e análise estrutural e assim, poder obter modelos que respondam às necessidades da exploração e da produção.

O 2DMove é o componente base e essencial presente no sistema Move, que pode ser aplicado a perfis estruturalmente complexos. É um programa de análise e modelação estrutural, que permite o balanceamento do comprimento de linhas e de áreas das secções que podem ser modeladas em qualquer regime tectónico, incluindo extensão, contracção, inversão ou na presença de sal. Com o 2DMove, podem ser realizadas, tanto *restaurações* estruturais como a respectiva modelação da evolução das estruturas até à actualidade.

A combinação de um modelo de *restauração* de rápida visualização (*restauração* em puzzle) com um modelo cinemático torna o 2DMove adequado para todos os estados de interpretação e análise necessários. Por outro lado integra uma metodologia de interpretação que inclui acesso directo aos dados sísmicos e a dados de poços, que auxiliam a validação e a construção da secção. O 2DMove fornece a visualização do mapa e da secção e uma gama completa de ferramentas de modelação cinemática, que são utilizadas detalhadamente na construção do modelo 2D.

Estas ferramentas incluem conversão em profundidade, *descompactação* (ligada à história de soterramento e à isostasia *Flexural* ou de *Airy*), desdobramento de camadas utilizando algoritmos que não restauram o movimento através das falhas (*Line Length Unfold*, *Flexural Slip Unfold* e *Restore*) e balanceamento da área, e serão abordadas detalhadamente ao longo deste capítulo. Os algoritmos cinemáticos, ou seja, que modelam a movimentação das falhas são o *Inclined Shear*, o *Fault Paralell Flow* e o *Trishear*, e serão abordados posteriormente neste capítulo, de um modo mais detalhado.

Ao serem realizadas restaurações sísmicas, é possível perceber a evolução geológica da região o que contribui para uma melhor compreensão do desenvolvimento de potenciais reservatórios e armadilhas.

É possível melhorar eficientemente a construção e a validação da interpretação da secção ao reconstruí-la no tempo, pois, em qualquer altura é possível identificar potenciais problemas na geometria das sequências restauradas, tornando possível melhorar a interpretação da secção sísmica. As funções do software operam no modelo evitando editá-lo desnecessariamente, no estado inicial da metodologia de trabalho e, se após a *restauração*, se tiverem observado incoerências na interpretação, estas podem ser rectificadas e serem rapidamente testados e comparados modelos alternativos. As ferramentas de edição existentes no 2DMove permitem que a secção seja reconstruída e preparada rapidamente para posteriores análises quantitativas detalhadas e para a apresentação final do modelo.

Deste modo, alcança-se um bom nível de detalhe e confiança nas interpretações sísmo-estratigráficas o que pode ser difícil ou até mesmo impossível de se conseguir sem estes métodos de *restauração*.

Quando terminada a *restauração* existem várias maneiras de exportar o trabalho realizado e os respectivos resultados. Podem-se exportar cópias à escala, de elevada qualidade, guardar as imagens ou ainda criar um ficheiro de animação (ficheiro de vídeo), caso as secções tiverem sido gravadas em ficheiros separados. Esta função de animação é útil, pois cada fase importante da *restauração* pode ser visualizada em formato de filme, o que permite uma compreensão adicional da evolução geológica e uma ajuda na apresentação dos resultados.

Os dados inseridos no 2DMove podem ser importados para o programa em diferentes formatos de imagem (*.dxf, Bitmap, entre outros), de interpretação estrutural (GeoQuest, Landmark, Charisma, GeoSec and Locace), ou como imagens sísmicas e dados de poços ou dados relativos à orientação e inclinação das estruturas (SEG-Y, Ascii e xyz).

2.1.1. Modelação estrutural: restauração e modelação para a actualidade

A modelação estrutural pode ser realizada tanto a restaurações como a modelações para a actualidade (Figura 2.1).

Numa *restauração* é removida toda a deformação existente numa secção sísmica ou num perfil até ao seu estado indeformado, ou até uma determinada etapa de interesse.

Na modelação até à actualidade aplica-se a quantidade de deformação conhecida ou assumida às camadas horizontais (ou geometria de deposição assumida) e à geometria das falhas, de modo a alcançar a arquitectura estrutural actual.

Também pode ser incorporada análise adicional com a modelação estrutural de modo a obter informação, por exemplo relativamente à fracturação sub-sísmica ou à migração de fluidos.

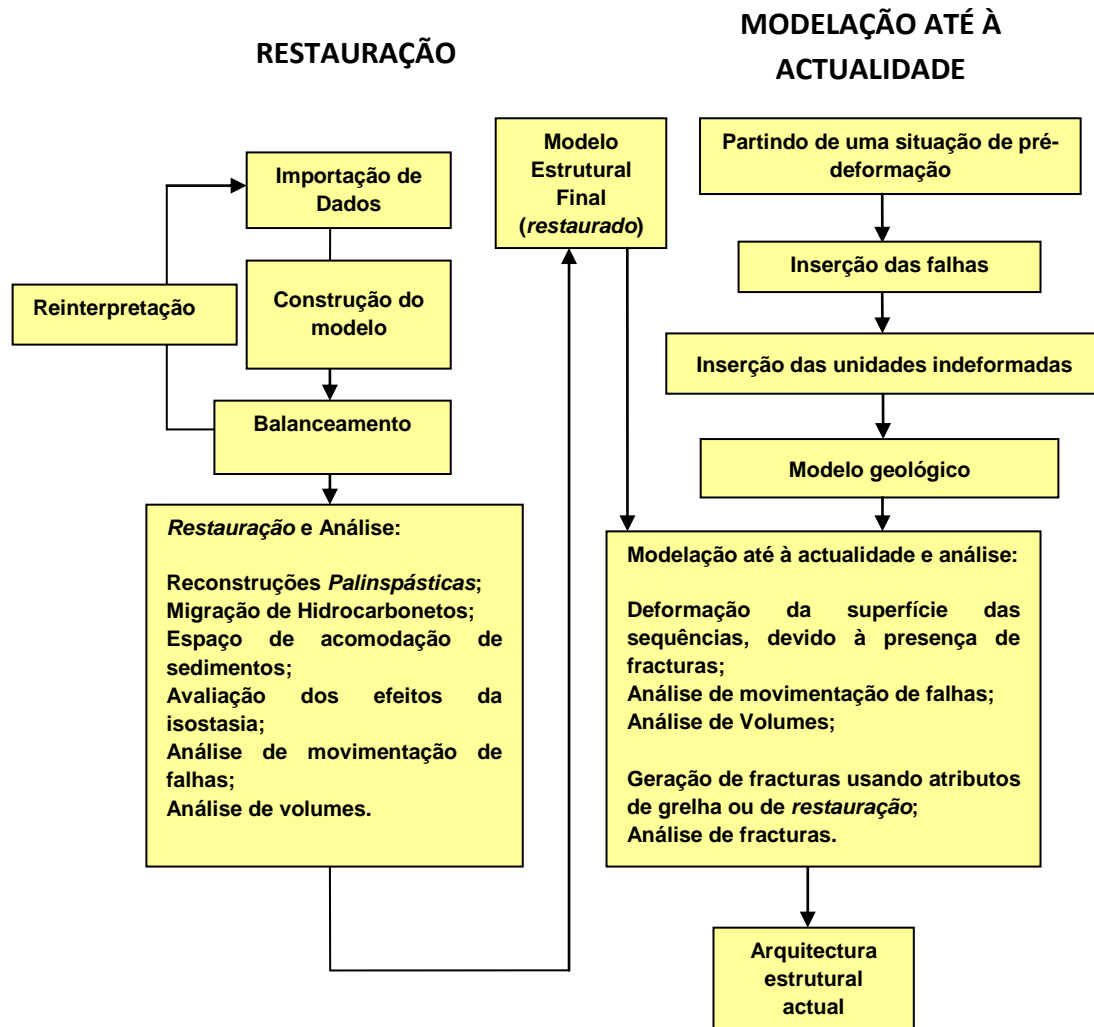


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo da metodologia de trabalho de uma *restauração* (à esquerda) e de uma modelação até à actualidade (à direita).

2.1.2. Balanceamento

Ao ser realizada a *restauração* para o estado indeformado a partir do estado deformado, assume-se que a deformação não cria nem destrói volume de rocha. O balanceamento é restrito a secções cuja direcção de transporte está contida no plano da secção. Assim, estruturas que envolvam deslocamento oblíquo ou de desligamento, rotação sobre um eixo não horizontal, e/ou estruturas relacionadas com sal, não poderão ser balanceadas com sucesso por técnicas tradicionais e em 2D.

O maior benefício em balancear modelos estruturais é validar interpretações (geológicas/geofísicas) e promover uma melhor compreensão relativamente à história geológica. As secções balanceadas podem ser restauradas de modo a que as camadas sejam colocadas na sua posição deposicional pré-deformada, tornando-se mais fácil relacionar os estados deformado e indeformado e, deste modo, analisar a deformação.

Segundo Goguel (1952) e Hossack (1979), o balanceamento assume a conservação do volume de rocha durante a deformação. Portanto, quaisquer variações de volume deverão ser avaliadas quantitativamente. Uma perda de volume rochoso poderá ser causada devido a processos como erosão, compactação de sedimento (Wood, 1974; Sanderson, 1976), compactação tectónica (Wood, 1974), dissolução por pressão (von Plessman, 1964) ou por deslocamentos ao longo de níveis de descolamento orogénicos (Ramsay e Wood, 1973). Por esta razão, quando se avalia a validade de uma interpretação é necessário ter em consideração esses processos. É importante referir que não existe necessariamente uma única solução de balanceamento para cada secção. Diferentes ambientes geológicos possuem processos ligeiramente diferentes ou únicos. Assim, as regras para o balanceamento também variarão ligeiramente. Diferentes combinações de deformação podem muitas vezes ser aplicadas de modo a obter o mesmo resultado.

As duas principais regras estruturais no balanceamento em 2D são a conservação do comprimento da camada e a conservação da área da camada. A conservação do comprimento da camada é baseado no pressuposto de que todas as camadas no estado deformado têm o mesmo comprimento que quando inicialmente depositadas. A conservação da área assume que a deformação não altera a área de uma unidade. Se a área é conservada, a quantidade de extensão pode ser usada para determinar a quantidade de deslocamento. Permite igualmente relacionar a geometria da falha com a deformação do tecto da falha, e vice-versa.

Em casos particulares, podem ser aplicadas outras regras importantes como por exemplo, assumir-se o dobramento como paralelo ou o deslizamento como constante. Assumem-se as dobras na secção com espessura constante (dobramento paralelo), criadas por deslizamento flexural, para que possam ser balanceadas por técnicas de comprimento de linha que assumem a conservação do comprimento do horizonte. O deslizamento ao longo de uma falha é assumido como constante, quando se lida com secções sísmicas com deformação plana. Alterações na quantidade de deslizamento podem ser atribuídas devido à acomodação do deslocamento por dobramento (crescimento de dobras devido a falhas) ou à divisão do deslocamento num determinado número de falhas que se abrem obliquamente, formando falhas imbricadas (Figura 2.2).

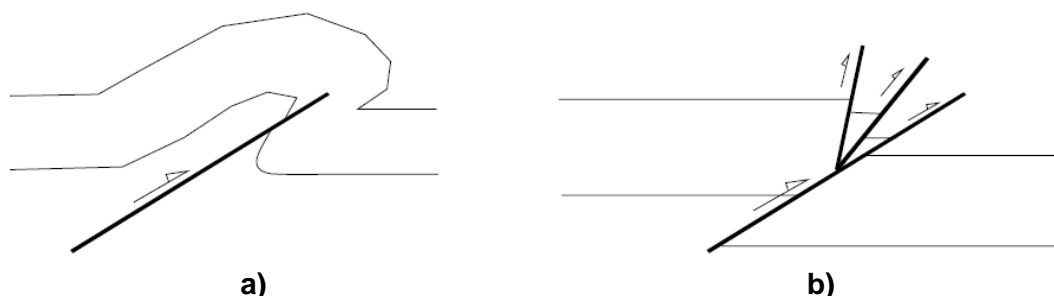


Figura 2.2 – Alterações na acomodação do deslocamento da falha; a) propagação da falha por dobramento; b) divisão do deslocamento (falhas imbricadas).

2.1.3. Balanceamento aplicado à restauração

A *restauração* estrutural no software 2DMove foi concebida para modelar as geometrias relacionadas com a deformação. No 2DMove são aplicadas as seguintes regras gerais nos algoritmos de deformação:

- O volume de rocha é conservado durante a deformação;
- As perdas de volume devido à pressão de compactação tectónica são consideradas mínimas;
- Os efeitos da erosão e da pressão tectónica, entre outros, deverão ser quantificados separadamente.

No 2DMove, é possível realizar os seguintes procedimentos em secções sísmicas:

- Quantificar e remover deslocamentos de falhas;
- Quantificar e remover efeitos provocados pela erosão;
- Quantificar e remover o volume perdido atribuído à compactação dos sedimentos;
- Remover as dobras relacionadas com falhas utilizando os algoritmos *Inclined Shear*, *Fault Parallel Flow* ou *Trishear*;
- Prever a geometria das falhas em profundidade, com base na geometria das camadas;
- Remover dobras relacionadas com deslizamento flexural.

As técnicas utilizadas em 2D para a *restauração* estrutural podem ser categorizadas em dois grupos:

- *Restaurações* onde não existem falhas. Normalmente utilizam-se os algoritmos de *restauração Line Length Unfold*, *Flexural Slip Unfold* ou o *Restore*;
- *Restaurações* onde existem falhas, sendo considerados os efeitos da geometria das falhas durante a deformação do tecto. Utilizam os algoritmos *Inclined Shear*, *Fault Parallel Flow* e *Trishear*.

Neste capítulo, serão abordados de forma detalhada, alguns dos vários algoritmos de *restauração*, existentes no 2DMove.

2.1.4. Restauração em Puzzle

A *restauração* em puzzle é o método utilizado para restaurar o rejeito das falhas e das dobras associadas, quando há pouca confiança na interpretação da geometria da falha. É um procedimento rápido que identifica o grosso das deficiências ou excessos no volume de rocha. O método assume que é conhecida a geometria deposicional original das camadas não deformadas. Esta pode ser horizontal ou possuir uma forma definida ou determinada, a partir de marcadores de bioestratigrafia, em profundidade.

O procedimento envolve a remoção do rejeito das falhas por desdobramento dos horizontes existentes em cada bloco de falha e, seguidamente a sua junção, utilizando

translação e/ou rotação dos mesmos. Esta *restauração* é comparável a montar um puzzle.

Uma deformação restaura-se em duas etapas:

- Desdobram-se os horizontes de interesse a um datum específico (utilizando os algoritmos de desdobramento).
- Transladam-se e rodam-se os blocos de falha de modo a encaixá-los. Nesta operação utiliza-se a caixa de ferramentas da transformação ou restaura-se a falha manualmente, aproximando os blocos de falha que se pretendam restaurar.

Pode-se assumir que áreas onde os blocos de falha se sobrepõem representam volume de rocha em excesso e que vazios entre os blocos de falha transladados, representam deficiências no volume de rocha interpretado (Figura 2.3). Estas sobreposições e vazios podem resultar de incoerências na interpretação geológica/sísmica, erosão de um horizonte específico ou ainda poderão ser devidas à utilização de um algoritmo de *restauração* inapropriado (o *Flexural Slip Unfolding* preserva a área enquanto que o *Restore* não).

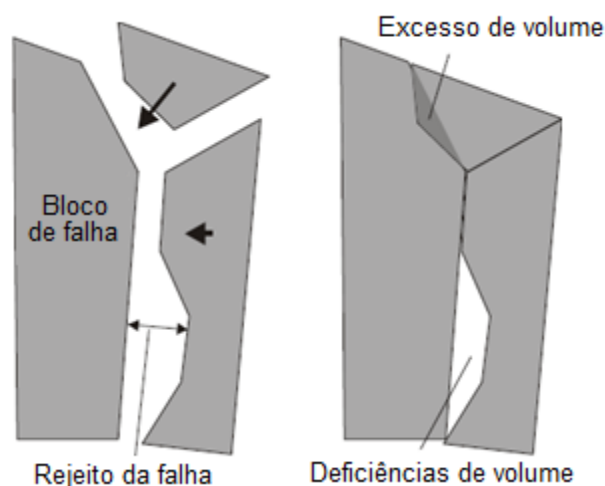


Figura 2.3 – Esquema ilustrativo da informação que pode ser retirada a partir de uma *restauração* em puzzle.

2.1.5. Restauração com base em secções sísmicas

As ferramentas de deformação das secções sísmicas do 2DMove são utilizadas de modo a transportar a imagem sísmica com as linhas e os polígonos, representativos das camadas e das falhas, durante a *restauração* estrutural. O objectivo de transportar a imagem sísmica é o de disponibilizar mais informação relativamente ao carácter sísmico no estado restaurado, o que permite melhorar a interpretação. Assim, no estado restaurado a imagem sísmica pode ser utilizada para modificar interpretações em horizontes e para indicar como correlacionar elementos sedimentares (uma vez que estão indeformados), entre outros (ver, por exemplo, a secção 3.1).

O uso mais comum destas ferramentas é validar a interpretação dos horizontes e das falhas através da *restauração*, para depois se poder alterar a interpretação com base no carácter sísmico, deformando a nova interpretação sísmica até ao estado actual. Este método produz uma interpretação estruturalmente viável que honra os dados sísmicos.

A transformação de uma secção com uma imagem sísmica associada levará mais tempo do que a simples transformação de linhas e polígonos. Existe uma variedade de metodologias possíveis, dependendo do tamanho da imagem e da complexidade da interpretação; no entanto, a primeira parte, comum a todas, é a de construção da secção sísmica.

Construção da secção

Começa-se por carregar a imagem sísmica e a respectiva interpretação. Se a interpretação não existir ainda, então pode ser criada no 2DMove. A imagem sísmica deverá encontrar-se delimitada; assim deverão ser desenhados dois postes verticais e duas linhas horizontais, uma no topo e outra na base da secção. Seguidamente, estendem-se e terminam-se correctamente todas as linhas desenhadas e redefine-se-lhes um intervalo de nós constante. Verifica-se se todas as linhas apresentam os horizontes e as cores correctas e se as falhas aparecem marcadas como tal. Definem-se polígonos que irão delimitar regiões de blocos de falha (estes serão utilizados para transportar a imagem sísmica dentro da respectiva área). Por último, verifica-se se todos os polígonos necessários foram criados.

Agora deverá optar-se pelo método que se pretende utilizar durante a *restauração*, de modo a aplicar todas as alterações à imagem sísmica. Pode-se realizar uma *restauração* sísmica simples, ou uma *restauração* (utilizando a caixa de ferramentas das restaurações sísmicas), utilizando a imagem sísmica inteira, uma imagem de resolução reduzida, ou não utilizando a imagem sísmica.

Restauração da secção

A imagem de uma secção sísmica pode ser restaurada utilizando a caixa de ferramentas de *restauração* sísmica ou sem a sua utilização. Numa *restauração* sem a caixa de ferramentas da *restauração* sísmica, a imagem deverá ser adicionada às caixas de ferramentas dos algoritmos necessários à *restauração*, juntamente com os restantes objectos, de modo a ser deformada com os mesmos.

A utilização da caixa de ferramentas de *restauração* sísmica possibilita várias formas que facilitam a *restauração*, pois tem a vantagem de se poder trabalhar com uma resolução da imagem diminuída ou sem a imagem. Deste modo, existem três modos de *restauração* de imagens sísmicas:

Restauração usando a resolução total da imagem

Neste caso, durante a *restauração*, a imagem sísmica é alterada em cada passo, com a sua resolução total, o que pode ser um processo moroso.

Restauração utilizando uma imagem com resolução reduzida

Este método permite que se possa realizar a *restauração* sísmica numa imagem com a resolução reduzida e depois de uma *restauração* satisfatória, aplicá-la à imagem original. Permite assim uma *restauração* mais rápida, especialmente se o processo de *restauração* requerer muitas tentativas para se conseguir o melhor resultado para a *restauração*.

Não se deverá guardar o documento entre os passos da *restauração*, quando se estiver a utilizar este método, pois será guardado por cima da imagem de resolução total. Após a imagem ter sido gravada, não se poderá voltar a alterar a sua qualidade.

Restauração sem a imagem sísmica

Este método permite desempenhar a *restauração* sísmica sem a imagem e depois de uma *restauração* satisfatória, aplicá-la à imagem original. É o método mais rápido se o utilizador for capaz de fazer a *restauração* com base apenas na interpretação.

Restauração, descompactação e conversão em profundidade usando imagens sísmicas

A *restauração* e a *descompactação* da imagem são realizadas com os polígonos seleccionados. Apenas as partes da imagem sobrepostas com os polígonos que foram seleccionados, serão restauradas. As restantes partes da imagem serão ignoradas. Quanto à conversão em profundidade (ver secção 2.2), não se utilizam polígonos, dado que se trabalha com a secção inteira. A imagem sísmica será depois convertida em profundidade, juntamente com os restantes objectos.

Utilização de polígonos para mover ou rodar partes da imagem

Como parte da metodologia de *restauração* sísmica, podem ser movidas ou rodadas partes das imagens. Para mover ou rodar a imagem abaixo de um polígono, deve-se utilizar a caixa de ferramentas das restaurações sísmicas.

Realizar a movimentação sem a imagem sísmica poderá ser útil quando se pretender a junção manual dos blocos de falha, pois normalmente é necessário um grande número de pequenos movimentos, de modo a juntar correctamente os blocos. Juntar os blocos como foi referido anteriormente com a imagem sísmica original, seria lento e poderia causar erros. Assim, utilizar a metodologia da *restauração* sem a imagem, permite que o movimento seja realizado mais rapidamente. Para além disso, a caixa de ferramentas combinará operações múltiplas de movimento num movimento simples, de modo a reduzir o erro e resultando numa imagem melhor.

Utilização da Caixa de Ferramentas de gravação

A utilização da caixa de ferramentas de gravação, juntamente com a caixa de ferramentas da *restauração* sísmica permite um controlo adicional sobre o processo de *restauração*. Quando se utiliza a caixa de ferramentas das restaurações sísmicas, esta

utiliza a gravação para guardar as várias fases de *restauração*, permitindo seguidamente utilizar a gravação de modo a desfazer a *restauração* e aplicá-la à imagem sísmica total.

Durante este procedimento, se a caixa de ferramentas de gravação estiver aberta com a caixa de ferramentas da *restauração* sísmica, pode ser visualizada a gravação a ser criada, o que permite a visualização da *restauração* na imagem total em cada passo. Ao guardar o ficheiro em passos diferentes, este pode ser utilizado para criar uma animação.

2.2. Conversão em profundidade

Como são utilizados métodos de aquisição sísmica na obtenção de uma secção sísmica, normalmente, a sua escala lateral encontra-se em tempo (TWT – tempo de ida e volta das ondas sísmicas reflectidas nas camadas).

A conversão em profundidade permite converter uma secção em tempo numa secção em profundidade (e vice-versa), o que corrige alguns efeitos na sísmica que surgem na secção em tempo devido às variações de velocidade nas diferentes camadas. Utiliza-se uma função simples, que reconstrói a secção ao longo de linhas verticais. O *datum* de tempo usado como referência é o tempo zero. As funções assumem uma relação linear entre a velocidade e a profundidade (Marsden, 1992). No programa existe a possibilidade de usar dois métodos para efectuar a conversão em profundidade:

- Utilização da velocidade num horizonte, a uma determinada profundidade;
- Utilização da velocidade num material à superfície (v_0).

2.2.1. Método utilizando a velocidade num horizonte, a uma determinada profundidade

Este método utiliza a velocidade das ondas P no topo de uma determinada camada, em profundidade. A espessura da camada é determinada pela Equação 2.1.

$$Z = \left(\frac{v_0}{k} \right) \times [(e^{kt}) - 1]$$

Equação 2.1 – Equação para a conversão em profundidade.

Onde, Z é a espessura da camada, em metros (m), v_0 é a velocidade no topo da camada, em metros por segundo (ms^{-1}), k é a taxa de variação da velocidade com o aumento da profundidade e t é o tempo de ida e volta para a espessura das camadas, em segundos (s).

Se $k = 0$, então utiliza-se a Equação 2.2. Deste modo, a espessura Z varia linearmente com o tempo pois não há taxa de variação da velocidade.

$$Z = v_0 t$$

Equação 2.2 - Equação para a conversão em profundidade caso o k seja 0.

Assim, no cálculo da espessura de uma camada utiliza-se a velocidade no horizonte que marca o seu topo e o tempo de ida e volta até à sua base.

2.2.2. Método utilizando a velocidade num material à superfície (v_0)

Este método utiliza a velocidade do material à superfície (v_0) e a taxa de variação da velocidade à medida que a camada é soterrada. Este método é mais eficaz no caso de camadas que se encontram deformadas e cuja profundidade varie significativamente.

Para o caso de duas camadas deformadas, as funções implementadas são dadas pelas equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$D_1 = \left(\frac{v_1}{k} \right) \times [(e^{k_1 t_1}) - 1]$$

Equação 2.3 – Profundidade na base da camada 1.

Onde D_1 é a profundidade na base da camada 1 (m), v_1 é a velocidade no topo da camada 1 (ms^{-1}), k_1 é a taxa de variação da velocidade com o aumento da profundidade da camada 1 e t_1 é o tempo de ida e volta para a espessura da camada 1 (s).

$$V_H = v_2 + (k_2 D_1)$$

Equação 2.4 – Velocidade do Horizonte.

Onde v_H é a velocidade do horizonte, v_2 é a velocidade no topo da camada 2 (ms^{-1}), k_2 é a taxa de variação da velocidade com o aumento da profundidade da camada 2 e D_1 é a profundidade da base da camada 1 (m).

$$D_2 = \left(\frac{v_H}{k_2} \right) \times [(e^{k_2 t_2}) - 1]$$

Equação 2.5 – Profundidade na base da camada 2.

Onde D_2 é a profundidade da base da camada 2 (m).

Se $k = 0$, então as profundidades D_1 e D_2 variam linearmente com o tempo, pois não há taxa de variação da velocidade.

2.2.3. Funções para a conversão em profundidade

Os métodos descritos anteriormente utilizam valores de velocidade e de taxa de variação de velocidade para cada camada, sendo necessária uma base de dados. Caso estes

valores não se encontrem disponíveis, podem ser usados valores pré-definidos, que assumem apenas uma velocidade de superfície e uma taxa de variação de velocidade para todo o perfil. Deste modo, a conversão utiliza apenas a linha da superfície e a linha base, ignorando os objectos intermédios, aplicando os valores pré-definidos a toda a secção.

Antes de se converter o modelo de tempo para profundidade (ou converter de volta para tempo) é possível escolher uma função que relacione os domínios de tempo e de profundidade.

É aplicado assim um modelo de velocidade de acordo com a variação que se pretender:

- Profundidade (y) com o tempo (x);
- Velocidade (y) com o Tempo (x);
- Tempo (y) com a profundidade (x);
- Velocidade (y) com a Profundidade (x).

Este modelo utiliza uma equação que é definida como a que melhor se adequa aos dados disponíveis. As equações (ou curvas) existentes no programa e que definem o modelo de velocidade são:

- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| • Constante | • Standard Power |
| • Linear | • Shifted Power |
| • Quadrática | • Pressão de vapor padrão |
| • Cúbica | • Weibull |
| • Exponencial | • Hoerl |
| • Exponencial inversa | • Hoerl Modificada |
| • Logarítmica | • MMF |
| • Log Recíproco | |

A opção padrão opera assumindo que a velocidade aumenta linearmente com a profundidade. Portanto, requer que se defina previamente uma velocidade inicial e uma taxa de variação com a profundidade. A equação constante é apenas válida para relações entre Velocidade/Profundidade e entre Velocidade/Tempo.

Quando os dados do modelo de velocidade são conhecidos, é possível ajustar uma tendência não linear. Assim, torna-se mais confiável a conversão em profundidade do que quando se utiliza a equação padrão. As restantes equações podem ser aplicadas a todas as quatro relações (acima mencionadas).

A caixa de ferramentas de conversão em profundidade

A caixa de ferramentas da conversão em profundidade (Figura 2.4) é aberta a partir do menu das operações.

De modo a converter uma secção de tempo em profundidade (ou de profundidade em tempo) é necessário em primeiro lugar, definir os valores de velocidade e da taxa de variação da velocidade com a profundidade. Caso se pretenda usar a base de dados,

esta deverá ser aberta e seleccionada. Seguidamente, define-se qual dos dois métodos de conversão descritos anteriormente se adequa melhor ao perfil, tendo em conta que o método da velocidade do horizonte utiliza um intervalo de velocidades, contrariamente ao método da velocidade de superfície (v_0).

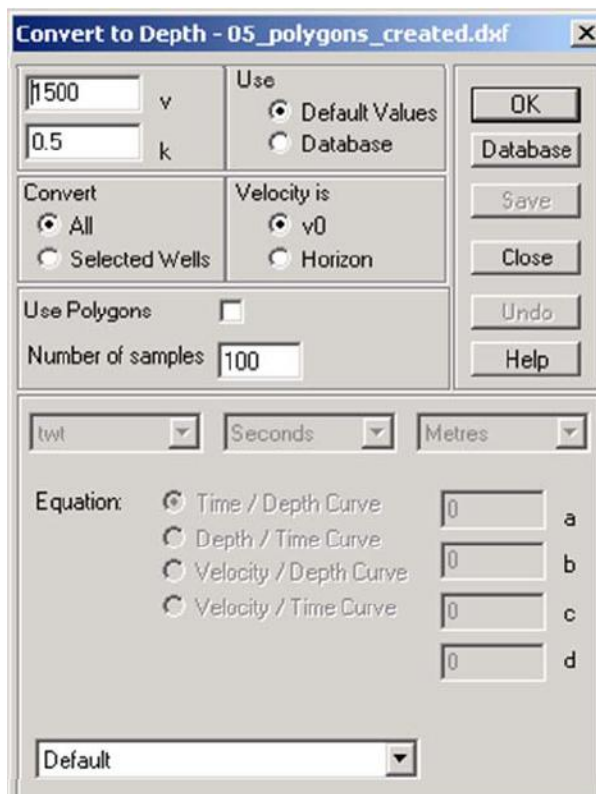


Figura 2.4 – Caixa de ferramentas da conversão em profundidade.

Podem surgir problemas na conversão quando existem blocos criados por uma série de falhas e quando se utilizam valores da base de dados (durante a conversão). Este problema surge quando, nos raios verticais utilizados no cálculo da conversão, uma falha inclinada produz uma falsa extensão do horizonte do topo do polígono, atravessando-o duas vezes.

2.3. Descompactação

A caixa de ferramentas da *descompactação* (Figura 2.5) permite a modelação dos efeitos de variação de volume da rocha devido à perda ou aumento da porosidade, por compactação ou *descompactação* respectivamente.

Simultaneamente com o cálculo da *descompactação*, podem ainda ser calculados os efeitos isostáticos (usando a isostasia *flexural* ou de *Airy*) e o historial da compactação (que permite obter curvas de soterramento).

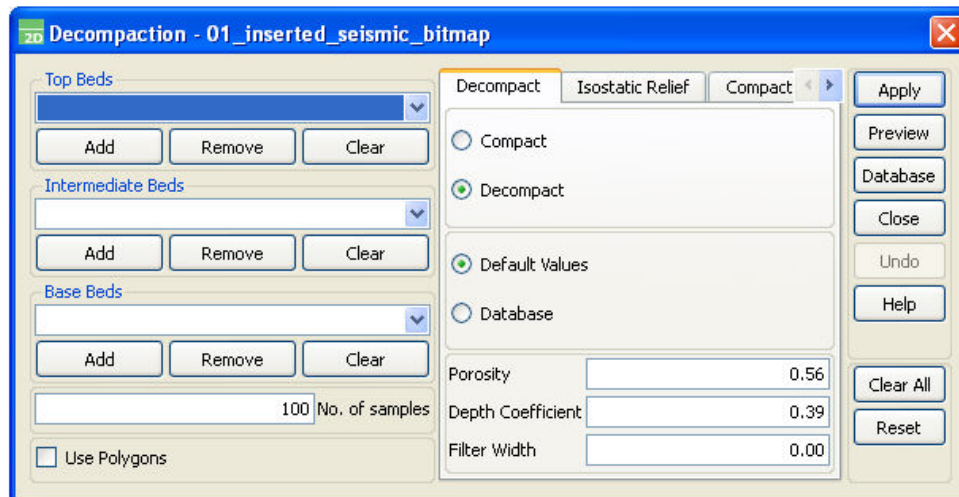


Figura 2.5 – Caixa de ferramentas da *descompactação*.

2.3.1. Compactação e Descompactação

Esta funcionalidade assume que a porosidade diminui com o aumento da profundidade (compactação) e que aumenta com a diminuição da profundidade (*descompactação*). O algoritmo de *descompactação*/compactação utilizado pelo software do programa funciona utilizando a Equação 2.6 de Sclater e Christie (1980):

$$f = f_0 (e^{-cy})$$

Equação 2.6 – Função utilizada durante a compactação ou a *descompactação*.

Onde f é a porosidade actual em profundidade, f_0 é a porosidade inicial à superfície (porosidade da unidade no tempo zero), c é a taxa de diminuição da porosidade com a profundidade ou o coeficiente de variação da porosidade com a profundidade, em quilómetros (km^{-1}), e y é a profundidade, em metros (m).

Antes de se efectuar qualquer *descompactação*, deverão ser conhecidos os valores de c e de f_0 para cada camada existente. Estes valores podem ser obtidos a partir de tabelas publicadas, calculados para uma determinada litologia ou até mesmo calculados para uma litologia mista, ou seja, que inclua vários tipos de litologias distintos.

Taxa de diminuição da porosidade com a profundidade (c) e porosidade inicial (f_0)

Na Tabela 2.1, apresentam-se porosidades à superfície (f_0), coeficientes de variação da porosidade com a profundidade (c) e densidades do grão dos sedimentos (ρ_{sg}) típicos cada tipo de litologia do Mar do Norte (Sclater e Christie, 1980).

Tabela 2.1 – Alguns parâmetros típicos de litologias do Mar do Norte (Sclater e Christie, 1980).

Litologia	Porosidade à superfície (f_0)	Coefficiente de variação da porosidade com a profundidade (km^{-1}) (c)	Densidade do grão do sedimento (ρ_{sg})
Argilitos	0.63	0.51	2720
Arenitos	0.49	0.27	2650
Calcário (Greda)	0.70	0.71	2710
Argilitos e Arenitos	0.56	0.39	2680

A porosidade crítica durante a sedimentação pode ser equiparada à porosidade de superfície (Mauko et al., 1996). A porosidade crítica é a do sedimento quando é inicialmente depositado, antes da compactação e da diagénese. Para porosidades mais baixas que a porosidade crítica, os grãos dos minerais são sustentadores de carga, enquanto que para porosidades mais elevadas que a crítica a rocha simplesmente desmorona-se tornando-se numa suspensão, com a fase fluida como sustentadora da carga. Embora o valor da porosidade crítica para cada amostra seja determinado pela triagem do grão e pela deposição angular, apresenta-se na Tabela 2.2 valores de porosidades típicas (Mauko et al., 1996) para diferentes tipos de litologias.

Tabela 2.2 – Alguns valores de porosidades de superfície típicos para várias litologias (Mauko et al., 1996).

Litologia	Porosidade de superfície (f_0)
Arenitos	0.4
Calcários	0.4
Dolomite	0.4
Pedra-Pomes	0.8
Calcário (Greda)	0.65
Sal	0.4

Caso se pretenda determinar f_0 e c para uma rocha específica, é necessário saber a porosidade da rocha a diferentes profundidades, utilizando valores de diferentes poços, quando existentes. Estes dados deverão ser posteriormente inseridos num gráfico de Porosidade – Profundidade, onde o decaimento da porosidade é assumido como uma exponencial. Depois de obtida a curva de melhor ajuste exponencial para os diferentes valores, é possível a determinação de f_0 e de c . O valor de f_0 corresponderá à porosidade

indicada pelo gráfico à profundidade zero e o valor de c será o gradiente da curva exponencial, isto é, a variação do decaimento da porosidade com a profundidade.

Caso um intervalo a ser descompactado seja composto por vários tipos de litologias distintos, é necessário determinar-se a média de c e de f_0 . Deste modo, em primeiro lugar, determina-se a percentagem de areias, siltes, argilitos e carbonatos para o intervalo em questão. Estas percentagens serão convertidas em valores de f_0 e de c , multiplicando o valor de f_0 e de c pelo valor da percentagem de cada componente da rocha, que será depois dividido por 100 de modo a obter-se uma componente de f_0 e de c para cada litologia. Os resultados obtidos para cada litologia são por último adicionados, de modo a obter-se um valor total para a litologia mista. Assim, este cálculo dá uma contribuição relativa do valor de c e de f_0 para cada litologia. Caso f_0 e c não sejam conhecidos, podem ser utilizados os valores obtidos para os sedimentos do Mar do Norte (Sclater and Christie, 1980).

Os valores resultantes para a porosidade de superfície (f_0) e para o coeficiente de variação da porosidade com a profundidade (c) são utilizados como parâmetros de entrada na base de dados, de modo a aplicar o algoritmo da *descompactação*.

Filtro de Descompactação - Largura do Filtro a utilizar

Quando se está a remover uma camada de espessura variável, especialmente se esta variar rapidamente ao ser atravessada por uma falha, a diferença no efeito da *descompactação* (ou compactação) pode causar artefactos tais como “levantamentos” ou “decaimentos” adjacentes à falha (Figura 2.6).

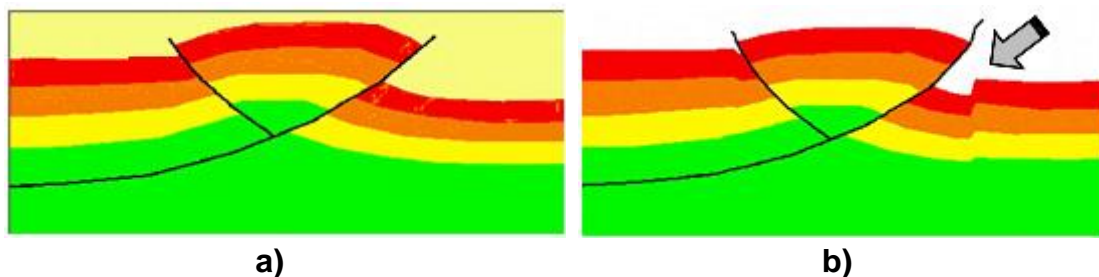


Figura 2.6 – *Descompactação* de camadas com litologias diferentes, utilizando uma largura de filtro de zero; a) antes da *descompactação*; b) após a *descompactação*.

Devido ao cálculo da *descompactação* ser efectuado utilizando linhas verticais, a alteração repentina da espessura da camada provoca um aumento rápido na quantidade de *descompactação* abaixo do ponto onde as camadas do tecto terminam, gerando assim um “salto” nas camadas.

Este efeito é uma particularidade do funcionamento do algoritmo, que pode ser minimizado utilizando um filtro flexural de *descompactação* que atribui um efeito de *descompactação* médio ao longo dos traços verticais, alisando o efeito de *descompactação* e evitando os artefactos adjacentes às falhas. Deste modo o filtro de *descompactação* é uma modificação flexural atenuadora, para a *descompactação*.

O valor do filtro corresponde à média dos efeitos de *descompactação* ao longo da distância a que é aplicado. Esta média é pesada e alterável, de modo a evitar alterações de *descompactação* repentinas.

A largura do filtro deverá ter aproximadamente o mesmo valor que o comprimento da característica que está a causar este efeito na *descompactação*. Na Figura 2.7, pode-se observar a mesma *descompactação* apresentada na Figura 2.6, aplicando um filtro.

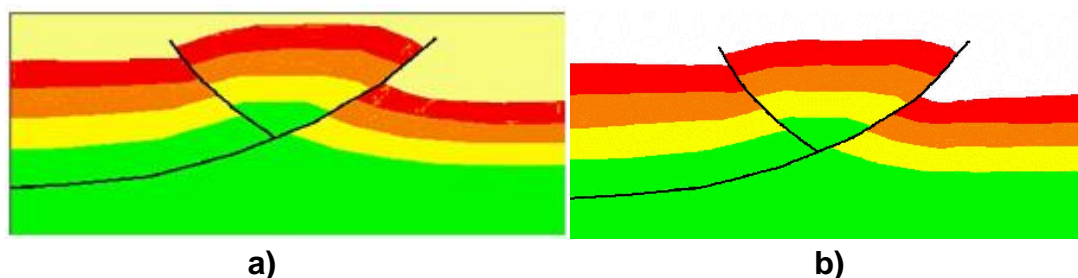


Figura 2.7 – *Descompactação* de camadas com litologias diferentes; a) antes da *descompactação*; b) *descompactação* realizada, após se inserir um filtro.

O filtro flexural é representado pela Equação 2.7 (Watts, 2001).

$$y = e^{-ax}(\cos(ax) + \sin(ax))$$

Equação 2.7 – Equação utilizada pelo filtro flexural.

Segundo Watts (2001), a Equação 2.7:

- Tem um máximo de $y = 1$ em $x = 0$;
- Cruza o zero ($y = 0$) em $x = \frac{3\pi}{4a}$;
- Tem o primeiro mínimo em $\frac{\pi}{a}$.

Portanto, a largura do filtro pode ser controlada com o parâmetro a .

Algumas opções da caixa de ferramentas da Descompactação

O botão de pré-visualização mostra as definições do parâmetro em causa e os resultados para todas as funcionalidades (*descompactação*, efeitos isostáticos e historial de soterramento), que podem ser visualizadas num ficheiro de texto antes de ser aplicado o algoritmo. Antes de se utilizar a função de pré-visualização, deverão ter sido inseridas as camadas do topo, da base e intermédias. Esta função mostrará a compensação isostática e as mudanças de espessura das camadas durante a *descompactação*/compactação. Por definição, serão calculados valores para a parte inferior esquerda da secção. Caso se pretenda determinar o valor para um local específico, deverá “picar-se” na coluna “X” existente no separador do historial de compactação, no local pretendido da secção, antes de se efectuar a pré-visualização. Deste modo, abre-se um ficheiro onde serão apresentados os resultados para a coluna pretendida.

O número de amostras corresponde ao número de linhas verticais (ou colunas) utilizadas no cálculo da *descompactação* (e na isostasia *Airy*, caso esteja activada), referente à camada pretendida. A diminuição do número de amostras suavizará os resultados da *descompactação* (ou compactação).

Deve-se seleccionar a opção da utilização de polígonos de modo a utilizá-los no cálculo da *descompactação* (ou da compactação). Esta acção é fundamental quando se trabalha com imagens sísmicas, onde são utilizados os polígonos, pois só assim as imagens poderão ser transformadas juntamente com os restantes objectos. Para se utilizar correctamente os polígonos, deverá ser verificado se todos se encontram associados a horizontes na base de dados. Caso não estejam, serão utilizados os valores pré-definidos. Quando se utilizam os polígonos, a espessura da unidade do topo corresponde à profundidade vertical do maior polígono que define a unidade. Caso se seleccione apenas as linhas como “camadas topo”, essa profundidade vertical corresponderá a zero. Para evitar este problema deve-se inserir como “camadas topo”, tanto o polígono como a linha do horizonte topo que o define.

Alguns casos especiais de descompactação: unidades sobrepressionadas e sal

As unidades sobrepressionadas em profundidade são anormalmente espessas comparativamente com essas mesmas unidades sujeitas a pressões normais. Para estas unidades, pode-se aplicar a função de porosidade – profundidade de Sclater and Christie (1980; utilizada para sedimentos normalmente pressionados), caso se assuma que o horizonte do topo de uma unidade possui um coeficiente de variação da porosidade com a profundidade equivalente a uma rocha incompressível (por exemplo de 0.001). Este valor deverá ser utilizado a cada passo da *descompactação*, até que a unidade sobrepressionada se situe acima da altura limite, onde se terá iniciado a sobrepressão. Nesta altura surge o problema relativo ao coeficiente de variação da porosidade com a profundidade que se deverá utilizar para a camada em questão, a partir daí. Poderão ser utilizados os valores tabelados para as litologias envolvidas.

Durante a compactação, o sal é considerado como incompressível. Durante a *descompactação* deverão ser atribuídos coeficientes de profundidade incompressíveis às unidades do sal (próximos de zero).

2.3.2. Efeitos Isostáticos

Ao serem aplicados efeitos isostáticos durante a *descompactação* da secção, esta será simultaneamente descompactada e isostaticamente compensada. Podem ser aplicados dois tipos de ajustamento isostático: de *Airy* ou *Flexural*. Neste trabalho irá apenas ser abordada a isostasia de *Airy*.

É importante ter em conta a resposta isostática à carga (ou descarga) pois esta afecta:

- Formas restauradas de horizontes e falhas e, portanto as geometrias restauradas de armadilhas;

- Paleo-topografias de superfícies submarinas restauradas, importantes na modelação da distribuição dos sedimentos;
- Alturas absolutas durante a *restauração* e, portanto, os estudos de maturação.

Isostasia de Airy

O modelo proposto por *Airy* postula que as diferenças topográficas de altitude são compensadas por variações na espessura da crosta. Quando se carrega ou descarrega a secção com camadas adicionais, a sua resposta é ajustar-se isostaticamente. O reajuste isostático é composto por um movimento vertical das superfícies, relativamente a uma referência base.

A compensação isostática de *Airy* é local, ou seja, apenas o material situado verticalmente acima e abaixo da carga é afectado, não havendo efeito lateral de carga/descarga. É utilizado quando se está a lidar com camadas que não variam significativamente a sua espessura lateral.

A isostasia de *Airy* é recomendada durante a *restauração* de secções que incluam sal, onde se deverá determinar a resposta isostática numa ou em várias linhas verticais, que não se encontrem na área de mobilidade do sal (ver secção 3.3).

Na Figura 2.8 está apresentado um esquema do modelo isostático de *Airy*. À esquerda tem-se a configuração inicial onde se observa a espessura da crosta (H_1), a profundidade da água (D_1) e a posição da crosta relativamente ao nível de referência (Z). Após o sedimento de espessura S ser carregado na secção, a costa compacta-se até à espessura H_2 , a profundidade da água diminui para D_2 e a crosta subside pela quantidade Z . O reajuste isostático é calculado utilizando a Equação 2.8.

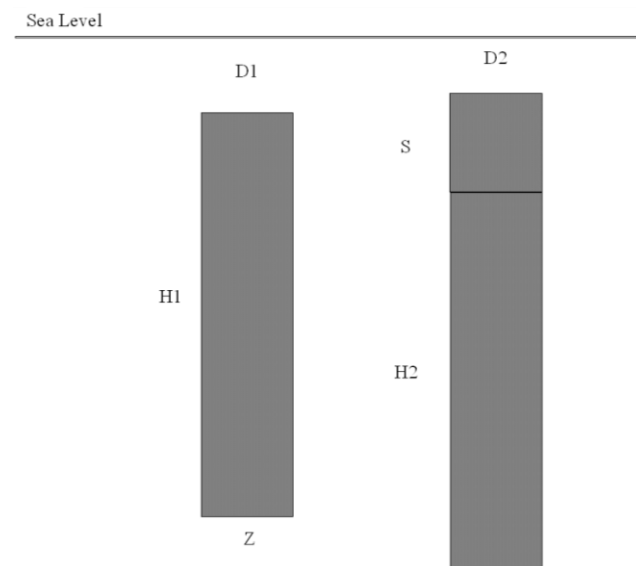


Figura 2.8 - Modelo isostático de *Airy*, onde D_1 é a profundidade da água antes da carga de sedimento e D_2 é a profundidade da água depois da carga do sedimento. As restantes variáveis encontram-se definidas posteriormente, no texto.

$$Z = [S - (H1 - H2)] \frac{P_c - P_w}{P_m - P_w}$$

Equação 2.8 – Reajuste isostático do modelo de *Airy*.

Na Figura 2.8 e na Equação 2.8, S é a espessura do sedimento (carregado ou descarregado), $H1$ é a espessura da crosta antes da carga de sedimento, $H2$ é a espessura da crosta depois da carga de sedimento, Z é a quantidade de subsidência. Na Equação 2.8, P_c é a densidade da crosta terrestre, P_w é a densidade da água e P_m é a densidade do manto.

2.3.3. Historial de compactação

Esta opção permite ao utilizador construir curvas de historial de compactação. A partir das definições de *descompactação* pode ser determinado um gráfico que funciona apenas quando se utiliza a base de dados. Calcula-se o historial de soterramento definindo-se a quantidade de levantamento para um ponto específico à medida que se remove cada horizonte sobrejacente. Nesta opção também é possível definir qual a parte da coluna da secção sísmica é que se pretende ajustar isostaticamente.

2.4. Algoritmos de restauração

No programa 2DMove, existem seis algoritmos de *restauração*:

- *Line Length Unfold*;
- *Flexural Slip Unfold*;
- *Restore*;
- *Inclined Shear*;
- *Fault Parallel Flow*;
- *Trishear*.

Destes seis algoritmos, três deles restauram um determinado horizonte deformado a uma linha *alvo* ou a um dado *datum* de referência. São eles o *Line Length Unfold*, o *Flexural Slip Unfold* e o *Restore*. Este procedimento é realizado desdobrando a unidade em questão e, por consequência as unidades subjacentes, até à linha *alvo*.

Os restantes três algoritmos (*Inclined Shear*, *Fault Parallel Flow* e *Trishear*), são utilizados para mover objectos ao longo de falhas, restaurando o rejeito das mesmas (muitas vezes denominados de algoritmos de *restauração* em falhas). Cada um destes algoritmos possui um estilo de deformação específico. Numa *restauração*, caso não se saiba que estilo de deformação utilizar, experimentam-se os diferentes algoritmos e verifica-se a sensibilidade ao algoritmo escolhido.

No presente trabalho apenas se abordarão quatro dos seis algoritmos existentes:

- *Flexural Slip Unfold*;
- *Restore*;
- *Inclined Shear*;
- *Fault Parallel Flow*.

De seguida irá ser explicado detalhadamente cada um destes algoritmos, segundo os tutoriais fornecidos pelo programa.

2.4.1. Flexural Slip Unfold

O algoritmo *Flexural Slip Unfold* permite o desdobramento de camadas para as suas posições de pré-deformação.

De modo a controlar o desdobramento, o algoritmo utiliza um *pin* e um sistema de deslizamento paralelo à camada *modelo*, que é desdobrada para uma linha *alvo* ou um *datum*, usando um vector não vertical. Deste modo são mantidas as variações de espessura entre as camadas. Pontos que intersectem o *pin* não serão desdobrados ou cisalhados, apenas transportados ao longo do *pin* até ao *datum*. O *pin* poderá corresponder à superfície axial da dobra. O cisalhamento paralelo das camadas *modelo* aumenta à medida que o *pin* está mais afastado das camadas (Griffiths et al., 2002).

O algoritmo é normalmente utilizado em sistemas tectónicos compressivos no desdobramento de dobras, normalmente com camadas paralelas. Também é utilizado na validação de deformações de dobras complexas que envolvam estruturas de sal intrusivas.

O modelo estrutural é validado se as rochas desdobradas forem reconstruídas de modo a formar uma geometria coerente.

Princípios do algoritmo em 2D:

- Mantém o comprimento da linha do horizonte *modelo*, na direcção do desdobramento.
- O comprimento da linha de todas as camadas paralelas às camadas *modelo* é mantido na direcção do desdobramento.
- Mantém a espessura ortogonal da unidade entre o horizonte *modelo* e os objectos passivos (ver Figura 2.9).
- Mantém a área da dobra.

Modo de funcionamento

Na Figura 2.9 é apresentado um esquema representativo do modo de funcionamento do algoritmo *Flexural Slip Unfolding*.

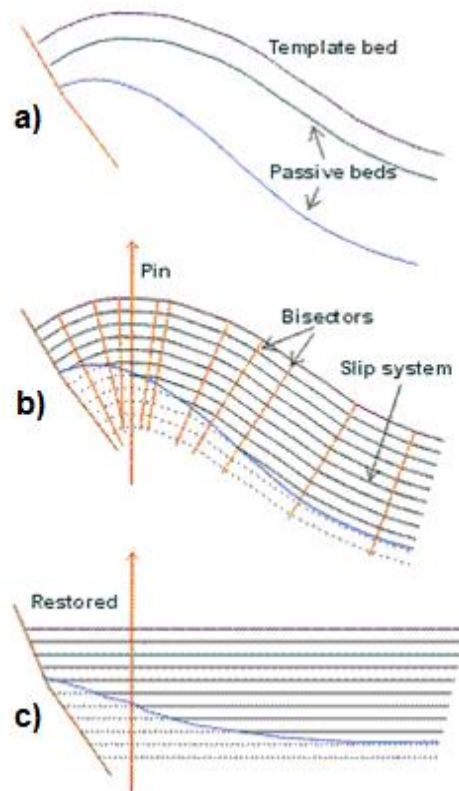


Figura 2.9 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo de *restauração*; a) dobra a ser desdobrada, com as variações de espessura; b) o sistema de deslizamento é construído paralelamente à camada *modelo*, utilizando os bissectores de deslizamento dominantes (a vermelho). As intersecções entre o sistema de deslizamento e as camadas passivas mantêm a espessura; c) a camada *modelo* e as camadas passivas são desdobradas à volta do *pin* (seta a vermelho).

É gerado um sistema de deslizamento (a preto) a partir dos bissectores de cisalhamento dominantes (a vermelho), que são projectados a partir da camada *modelo* (violeta, Figura 2.9b).

Calculam-se os caminhos de deslizamento para todos os pontos dos objectos passivos, na direcção do desdobramento, de modo a garantir que a espessura ortogonal não seja alterada, e portanto a área de desdobramento é mantida entre as camadas passivas (azul) e *modelo* (violeta). O sistema de deslizamento controla o desdobramento das restantes camadas na dobra e actua como uma ligação entre as camadas. Para todas as camadas passivas são calculados os bissectores utilizados.

O algoritmo desdobra assim a camada *modelo* (a violeta) e o seu sistema de deslizamento (a preto), a um *datum* horizontal (Figura 2.9c) ou a um *datum* regional assumido.

A caixa de ferramentas do Flexural Slip Unfold:

A caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold* pode ser aberta a partir do menu de *restauração* (Figura 2.10).

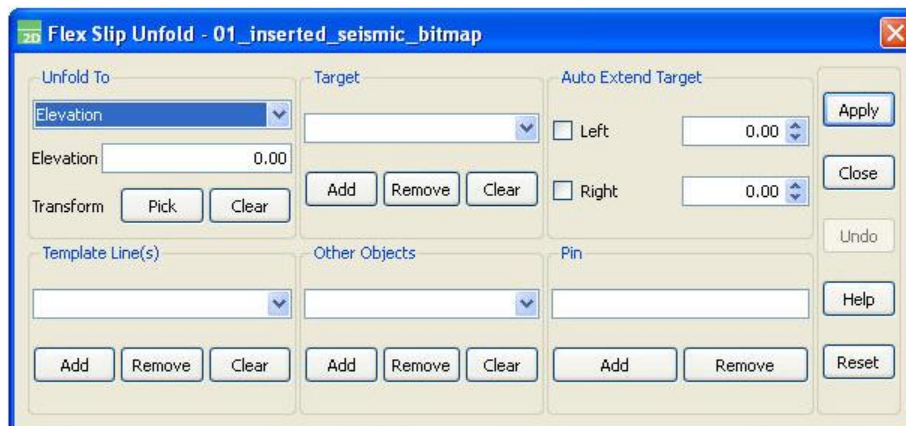


Figura 2.10 – Caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold*.

Na caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold* (Figura 2.10), a linha *modelo* corresponde à linha que se pretende desdobrar para a horizontal ou a uma linha *alvo*. Normalmente corresponde à linha mais superficial. Os “outros objectos” são aqueles que serão passivamente restaurados com a linha *modelo*. O *target*, ou linha *alvo*, é a linha à qual a linha *template* ou a linha *modelo* irá ser restaurada (por exemplo, uma paleo-batimetria).

Insere-se um *pin* na secção, que aparecerá como uma seta. Este *pin* deverá intersectar a camada *modelo* juntamente com a linha *alvo*, o *datum* ou a elevação pretendida. A camada *modelo* e o sistema de deslizamento serão assim desdobrados perpendicularmente à linha do *pin*.

Se ao ser aplicado o algoritmo aparecerem geometrias incorrectas deverá verificar-se os bissectores abaixo das linhas *alvo* e *modelo*. Caso existam problemas, então deverá redefinir-se ou editarem-se os nós das linhas.

2.4.2. Restore

O algoritmo *Restore* utiliza um processo de cisalhamento vertical ou inclinado simples, que desdobra horizontes geológicos, permitindo que sejam restaurados para uma condição de pré-deformação. Os horizontes são desdobrados a um *datum* ou a um *alvo* específico (*target*), como por exemplo uma paleo-topografia ou uma paleo-batimetria conhecida.

É o algoritmo adequado para horizontalizar um declive regional que não incline demasiado (aproximadamente 1,5°) e é normalmente utilizado em sistemas extensionais.

Princípios do algoritmo em 2D:

- A área das camadas (área formada entre a linha *modelo* e as outras linhas) é preservada entre os estados deformado e não-deformado;

- O comprimento da linha não é preservado, ou seja, varia entre os estados deformado e não deformado. O comprimento diminui a sua magnitude, quando a camada a ser restaurada possui demasiada inclinação;
- A espessura da camada restaurada é preservada na direcção do cisalhamento. Caso seja utilizado o cisalhamento vertical, a camada irá permanecer na mesma posição geográfica (não há transporte lateral).

Modo de funcionamento

Na Figura 2.11, está ilustrado um esquema que mostra o funcionamento do algoritmo *Restore*.

Na primeira ilustração (Figura 2.11a), a linha do topo da camada superior (linha *modelo*, a azul) irá ser restaurada até um datum horizontal (a verde). Os vectores verticais (a preto), utilizados para restaurar a camada superior, são os mesmos vectores que os usados para a camada inferior (a vermelho).

Na segunda ilustração (Figura 2.11b), visualiza-se já a geometria restaurada, com o algoritmo *Restore*, das camadas superior e inferior. O comprimento da linha do topo das camadas (Figura 2.11a) é superior ao comprimento da linha do topo das camadas restauradas (Figura 2.11b).

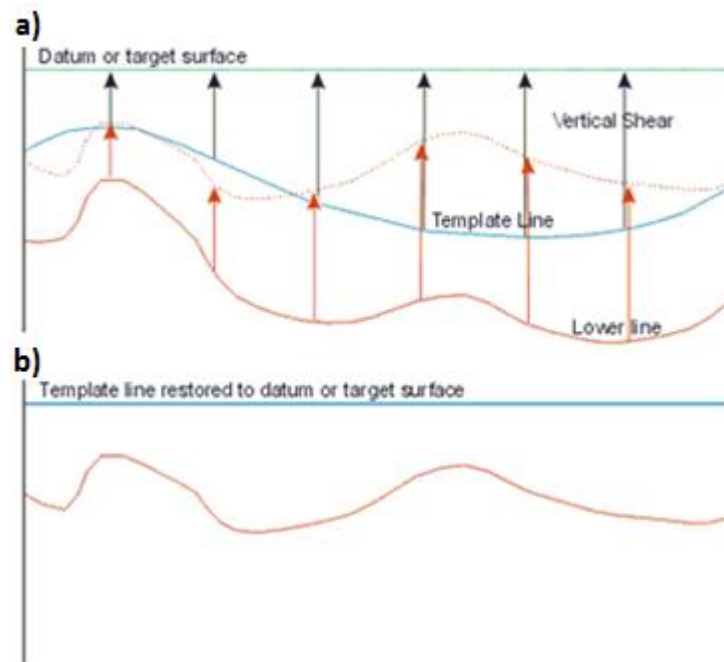


Figura 2.11 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo *Restore*; a) restauração da linha *modelo* (a azul), para um datum horizontal (verde); b) geometria restaurada dos horizontes superior e inferior.

A caixa de ferramentas do Restore

Abre-se a partir do menu de *Restauração* (Figura 2.12). Quando a caixa de ferramentas está aberta, aparece na janela do 2DMove uma seta vermelha, a indicar a orientação do vector de cisalhamento.

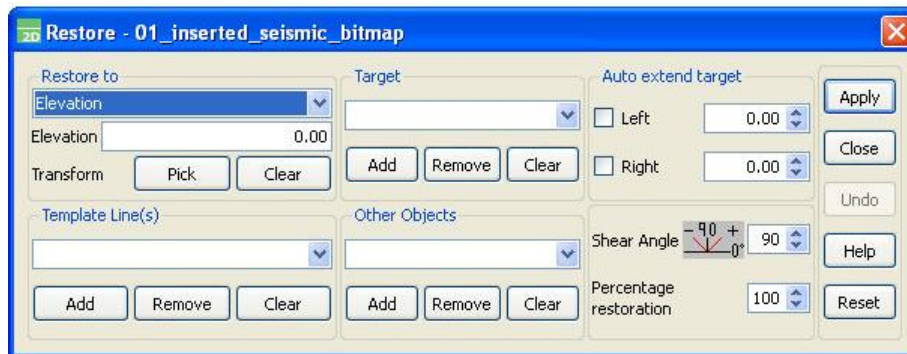


Figura 2.12 – Caixa de ferramentas do algoritmo *Restore*.

Na caixa de ferramentas do *Restore* (Figura 2.12), as linhas *modelo* correspondem às linhas que se pretendem restaurar a um *datum* (que pode ser uma elevação fixa ou uma linha *alvo*). As linhas *modelo* correspondem, normalmente, às linhas à superfície. Os outros objectos são objectos que irão ser passivamente restaurados com a linha *modelo* e sob os mesmos parâmetros definidos (assim a área entre as linhas é preservada). A linha *alvo*, é a linha à qual a linha *modelo* será restaurada (por exemplo, uma paleobatimetria).

Antes de ser efectuada a *restauração*, é necessário escolher o modo de *restauração* que se pretende utilizar. Pode-se escolher elevar a linha *modelo* a uma determinada elevação, ou elevá-la a um *alvo* (uma determinada linha que terá que ser desenhada). Quando se restaura através de uma elevação, observa-se se a secção está numa convenção de profundidade (abaixo do nível do mar) ou de elevação (acima do nível do mar) e define-se a quantidade de elevação pretendida. Se for escolhida a opção de *restauração* a um *alvo*, então será necessário seleccionar a respectiva linha, à qual se pretende restaurar a secção.

Caso se pretenda realizar uma operação de transformação, na qual o *modelo* e os outros objectos serão transferidos e depois restaurados para uma posição específica, então é necessário “picar” um ponto no *modelo* e seguidamente “picar” um ponto no *alvo* ou na elevação, dependendo do modo de *restauração* pretendido. Uma seta amarela identificará a transferência requerida, que no final da transformação pretendida, terá que ser removida.

É possível escolher a percentagem de *restauração* a realizar. A caixa de ferramentas do *Restore* (Figura 2.12) está pré-definida para restaurar completamente a linha *modelo* até ao *datum* ou até à linha *alvo*, apresentando o valor de 100%. No entanto este valor pode ser alterado mediante a quantidade de *restauração* que se pretender. Caso apenas se pretenda realizar metade da *restauração* terá que se alterar este valor para 50%, e assim sucessivamente.

O vector de cisalhamento é o ângulo interno de cisalhamento que será usado para deformar o bloco inicial. Terá que se inserir ângulo que se pretende utilizar. Este controlará o caminho ao longo do qual ocorrerá a *restauração* pretendida. A orientação padrão para este vector é vertical (90° graus). O vector é representado por um *pin* vermelho situado a meio da secção, e no qual é apresentado segundo o ângulo definido para a *restauração*.

É possível fazer um “reset” na caixa de ferramentas. Esta voltará ao seu estado pré-definido removendo quaisquer definições inseridas anteriormente, tais como, objectos seleccionados. Qualquer *restauração* realizada pode ser desfeita, utilizando o botão de retroceder, na caixa de ferramentas.

Alguns exemplos de restauração

Seguidamente irão ser apresentados alguns exemplos de *restauração* de modo a demonstrar algumas limitações do método e alguns dos parâmetros acima mencionados.

Na Figura 2.13, a linha vermelha e a linha verde representam uma dobra, e serão restauradas até uma determinada elevação (linha preta). Os mesmos vectores de cisalhamento vertical transformam ambas as linhas. Este processo mantém a área entre os estados restaurado e não restaurado.

A Figura 2.14 apresenta a *restauração* de uma dobra, utilizando um vector de cisalhamento inclinado, correspondente a 45°. No local onde a linha verde se localiza fora da linha de *restauração* (no extremo esquerdo da figura) é utilizado o mesmo vector (correspondente ao vector 1). Isto poderá criar um erro, onde a linha *modelo* (vermelho) é menor e mais profunda em diferentes disposições, relativamente à linha subjacente (verde).

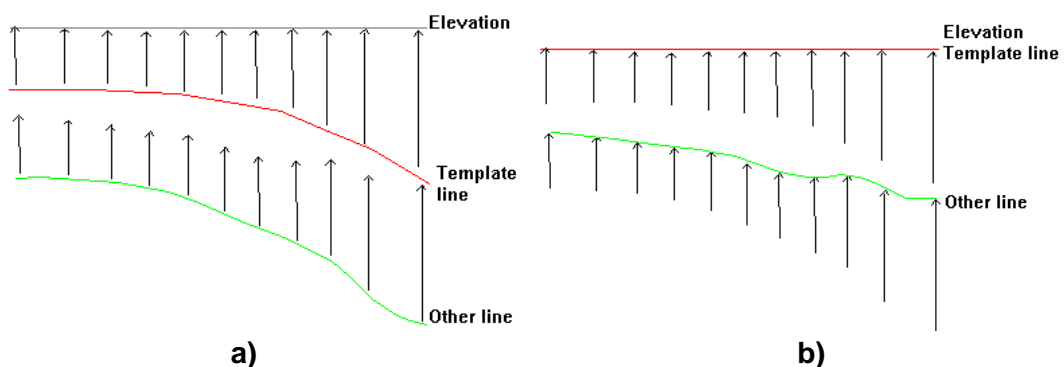


Figura 2.13 - Esquema de *restauração* através de uma dobra do tecto de uma falha, utilizando um vector de cisalhamento vertical (90°); a) antes da *restauração*; b) após a *restauração*.

A Figura 2.15 representa uma *restauração* até uma linha *alvo* (preto). Se a linha *modelo* (vermelho) se estende além da linha *alvo* (preto) então essa parte da linha é restaurada usando um vector, consoante o ilustrado. A forma da linha, que se estende além da linha *alvo* (preto) não é alterada. Caso se estendesse a linha *alvo* à direita e à esquerda (Figura 2.16), a situação de *restauração* seria equivalente.

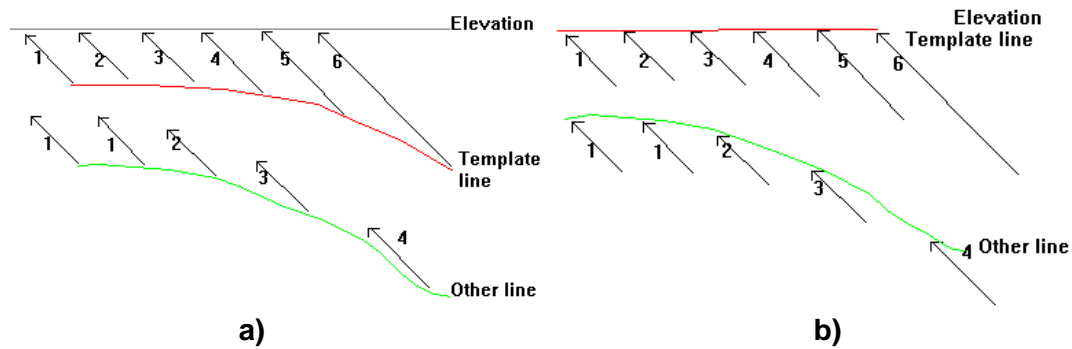


Figura 2.14 – Esquema de *restauração* de uma dobra do tecto de uma falha, utilizando um vector de cisalhamento inclinado (45°); a) antes da *restauração*; b) após a *restauração*.

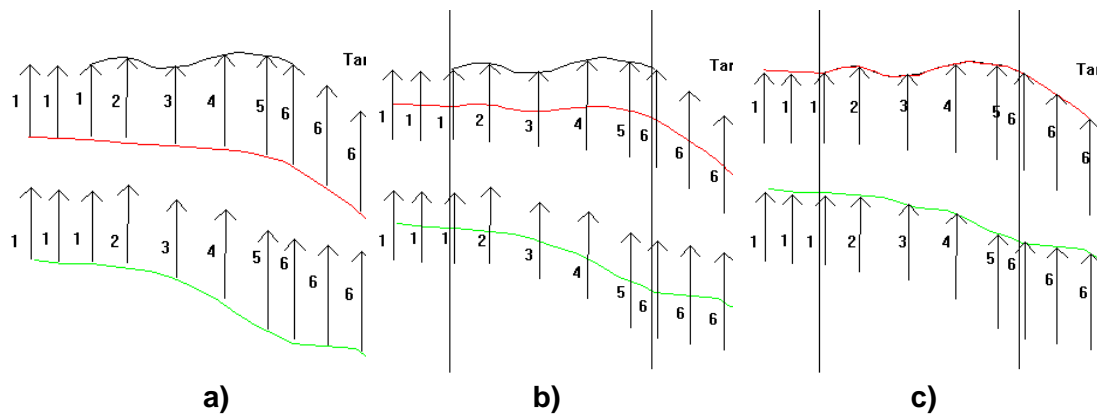


Figura 2.15 - *Restauração* até uma linha alvo (a preto) utilizando o cisalhamento vertical; a) 0% da *restauração*; b) 50% da *restauração*; c) 100% da *restauração*. As linhas pretas verticais representam os postes.

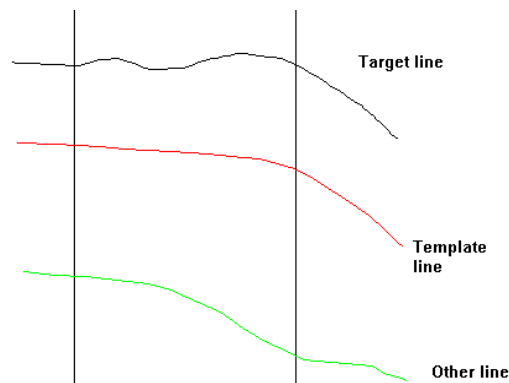


Figura 2.16 - Linha alvo estendida à esquerda e à direita.

A Figura 2.17 representa uma *restauração* onde a linha alvo (preto) é compensada à esquerda. Esta situação é equivalente a estender a linha à esquerda e à direita (Figura 2.18).

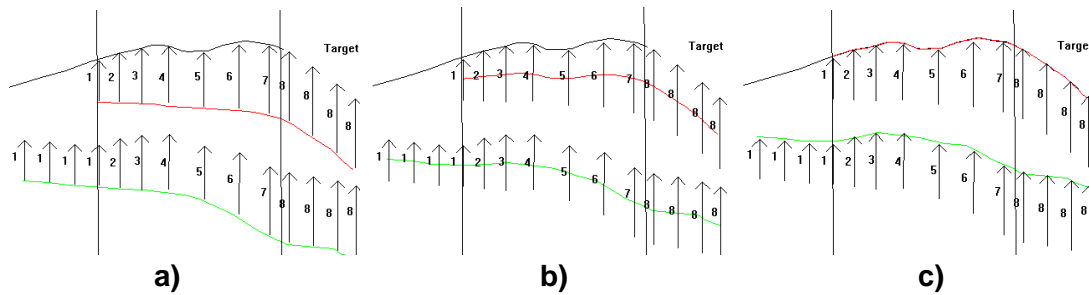


Figura 2.17 - Restauração utilizando o cisalhamento vertical de modo a deslocar as linhas modelo a uma linha alvo; a) 0% da restauração; b) 50% restauração; c) 100% da restauração. As linhas pretas verticais representam os postes.

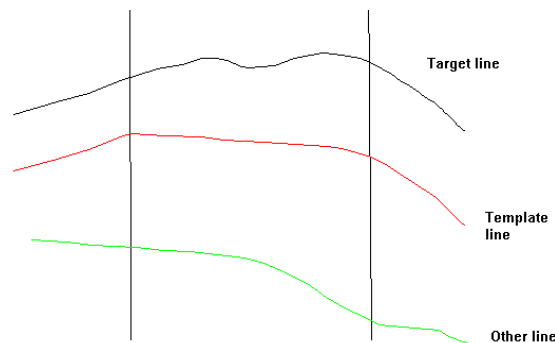


Figura 2.18 – Linha alvo estendida à esquerda e à direita.

2.4.3. Inclined Shear

O *Inclined Shear* (cisalhamento inclinado) é um algoritmo de restauração de falhas, baseado no trabalho de Verrall (1981), Gibbs (1983) e Withjack e Peterson (1993). Este modela geometricamente a relação entre a geometria das falhas e as características de deformação dos elementos dos tectos das falhas. É utilizado para modelar deformações que ocorrem em sistemas de deslizamento do tecto da falha, ao longo de um determinado ângulo.

O algoritmo *Inclined shear* é aplicado mais eficazmente em regimes tectónicos extensionais, quando se formam estruturas de anticlinal de *rollover* em falhas normais lístricas. Uma falha lístrica é definida como uma falha que diminui a sua inclinação com a profundidade. A curvatura ou mudança na inclinação numa falha é responsável pela deformação do seu tecto.

Este algoritmo pode também ser aplicado na restauração ou na modelação até à actualidade de bacias invertidas e de falhas de crescimento, onde a espessura das camadas pode variar.

Princípios do algoritmo em 2D

- A área do tecto da falha é conservada, ou seja, a área das camadas existentes no tecto da falha é mantida.
- O comprimento dos vectores de cisalhamento é mantido. O comprimento dos vectores é a distância entre o plano de falha e o marcador do horizonte no tecto da falha, na orientação do vector de cisalhamento.

Modo de funcionamento

O *Inclined Shear* utiliza três parâmetros que controlam a *restauração*: direcção do movimento, tipo de deslocamento e vector de cisalhamento. Deste modo, o algoritmo funciona especificando em primeiro lugar a direcção do movimento e o tipo de deslocamento que moverá depois o tecto da falha, segundo um determinado vector de cisalhamento que pode ser orientado verticalmente, sinteticamente ou antiteticamente ao plano de falha.

Devido à extensão, cria-se um vazio entre o plano de falha e o tecto, que colapsa ao longo do plano de falha. A deformação provocada pelo colapso é controlada pelo vector de cisalhamento que é representado por uma série de *pins* paralelos, que movem cada ponto do tecto da falha pela distância horizontal requerida (o deslocamento) segundo uma trajectória paralela à falha. O comprimento dos vectores não altera a deformação, pelo que a topografia do plano de falha é propagada às camadas do tecto da falha, na forma de uma dobra (Figura 2.19).

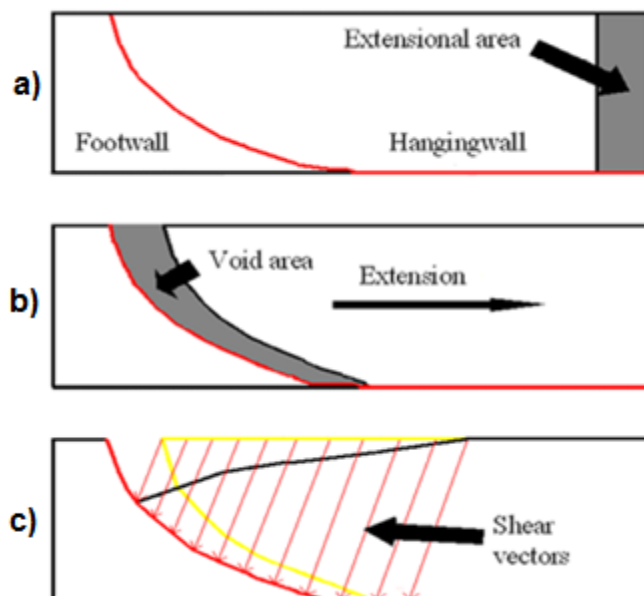


Figura 2.19 - Esquema representativo do funcionamento do algoritmo *Inclined Shear*; a) estado inicial mostrando o montante a ser estendido; b) a extensão cria um vazio entre os blocos do tecto e do muro da falha, onde a área do vazio é equivalente à área de extensão; c) o vector de cisalhamento especifica o caminho dos elementos do tecto da falha durante o colapso, removendo o espaço vazio (neste exemplo, o vector é orientado antiteticamente ao plano de falha).

A caixa de ferramentas *Inclined Shear*

A caixa de ferramentas do *Inclined Shear* (Figura 2.20) é aberta a partir do menu de *restauração*. Ao abrir esta caixa de ferramentas, aparece uma seta vermelha na janela principal do 2DMove, que indica a orientação do vector de cisalhamento.

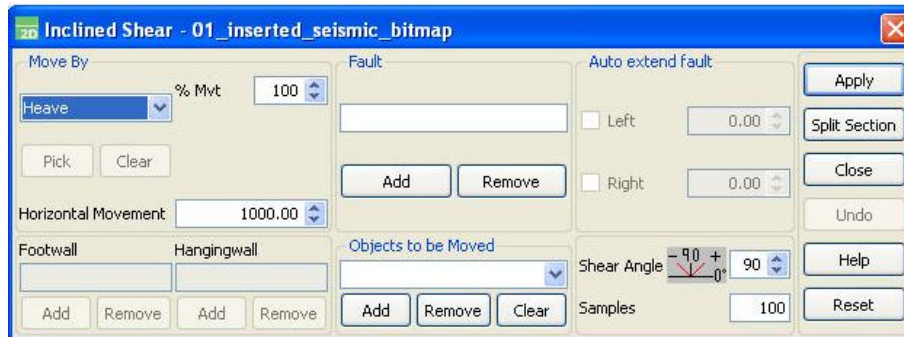


Figura 2.20 – Caixa de ferramentas do *Inclined Shear*.

Os objectos a serem movidos representam todos os objectos existentes no tecto da falha e que serão movidos ao longo da mesma. O campo de falha corresponde à falha na qual o tecto da falha será movido. De modo a permitir a deformação ser modelada além do comprimento da falha seleccionada, é possível estendê-la à esquerda e à direita, podendo ser controlada a orientação da extremidade da falha que se pretender. Este modo de estender a falha deverá estar orientado paralelamente ao deslocamento principal.

O ângulo de cisalhamento controla o caminho de colapso dos elementos do tecto da falha, ao longo do seu plano. O vector deverá estar orientado paralelamente à falha ou ser orientado de acordo com o plano axial do anticlinal de rollover. Hauge e Gray (1996) indicam que o ângulo de cisalhamento oblíquo antitético aplicado à maior parte das bacias é de $60^\circ \pm 10^\circ$, medido a partir da horizontal. No entanto para um primeiro passo na *restauração*, é apropriado utilizar um vector vertical. De modo a determinar o ângulo de cisalhamento adequado, realizam-se diversas tentativas, até que na *restauração*, os elementos do tecto da falha apareçam planos ou até que, na modelação de regresso à actualidade, a forma da dobra seja recriada. Podem-se também usar ângulos de cisalhamento diferentes, para diferentes partes da estrutura. Na Figura 2.21, está apresentado um exemplo para a definição do ângulo de cisalhamento.

O vector de cisalhamento pré-definido na caixa de ferramentas do *Inclined shear* é o cisalhamento vertical (90°). A convenção implementada no programa define que o vector de cisalhamento é medido a partir da horizontal e que 0° representa um vector horizontal. Por definição, vectores de cisalhamento positivos inclinam para a direita e vectores de cisalhamento negativos inclinam para a esquerda.

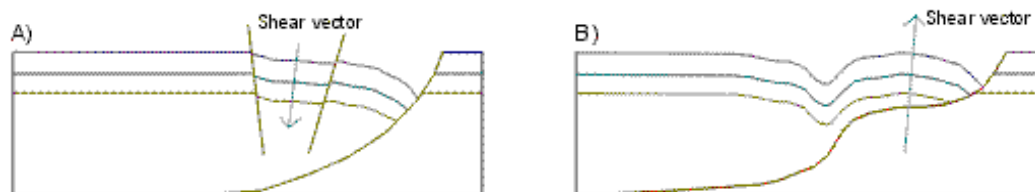


Figura 2.21 – Definição do ângulo do vector de cisalhamento (dependendo do ângulo inserido, o vector terá diferentes posições); a) o vector de cisalhamento é orientado como uma média das falhas sintética e antitética em relação ao deslocamento principal; b) o vector de cisalhamento é paralelo ao plano axial do anticlinal de rollover.

Existem três métodos, no 2DMove, para restaurar o deslocamento das camadas ao longo de uma falha. Pode-se inserir directamente a elevação a restaurar, juntar as duas camadas dos dois lados da falha ou usar a opção de definir um ponto inicial e um ponto final de movimento ao longo da falha.

Ao especificar-se directamente uma elevação, define-se o deslocamento horizontal pretendido para a movimentação dos elementos do tecto da falha. O valor inserido deverá estar nas mesmas unidades que as especificadas pelo modelo. Por convenção, o deslocamento que se realiza à esquerda considera-se negativo e o deslocamento à direita, positivo.

Uma alternativa para especificar o deslocamento pretendido é fazer coincidir o mesmo horizonte da camada no tecto e no muro da falha. Este método denomina-se de junção de camadas. O tecto da falha é sempre movido relativamente ao muro.

A opção de movimentação entre dois pontos definidos ao longo do plano de falha permite especificar com exactidão a quantidade de deslocamento pretendida. Assim, marca-se um ponto no tecto da falha e um segundo ponto para o qual se pretende que o tecto da falha seja movido. Entre os dois pontos marcados será desenhada uma seta amarela sendo automaticamente actualizado o valor do deslocamento. A seta permanecerá na secção após a operação, de modo a ajudar futuramente na modelação até à actualidade.

2.4.4. Fault Parallel Flow

O algoritmo *Fault Parallel Flow*, desenvolvido em colaboração com a Universidade de Keele por Kane et al. (1997) e Egan et al. (1997), foi desenhado para modelar o movimento das estruturas geológicas existentes no tecto da falha, quando o fluxo da deformação ocorre paralelo a esta. As partículas no tecto da falha são movidas ao longo das linhas de fluxo, que são paralelas ao plano de falha.

O plano de falha é dividido em domínios de inclinação discretos usando para o efeito linhas bissectoras (Figura 2.22). As linhas de fluxo são construídas conectando os pontos nos diferentes bissectores de inclinação (a vermelho) a igual distância do plano de falha.

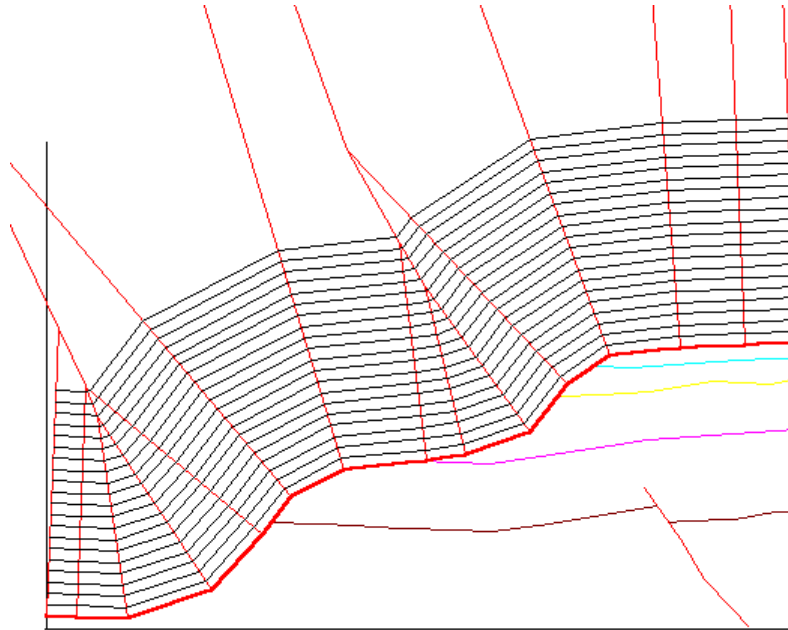


Figura 2.22 – Esquema ilustrativo da relação entre a geometria da falha, os bissectores de inclinação e as linhas de fluxo do tecto da falha no algoritmo *Fault Parallel Flow*.

A aplicação deste algoritmo não se restringe a geometrias de falha simples, com uma inclinação de menos de 30°. Este algoritmo foi desenvolvido especialmente para geometrias de falhas complexas de modo a modelar o movimento do tecto das falhas em zonas de cavalgamentos e dobramentos, onde a maioria da deformação ocorre discretamente entre as interfaces das camadas. No entanto, pode também ser aplicado em sistemas tectónicos extensionais, que produzam um anticlinal de *rollover* largo associado a falhas lítricas. É comparável a utilizar um cisalhamento antitético com o algoritmo *Inclined Shear*.

Princípios do algoritmo em 2D

- Mantém a área das camadas do tecto da falha.
- Permite preservar a espessura, dependendo do valor do cisalhamento angular escolhido.
- Funciona em geometrias de falha complexas.
- O muro da falha permanece indeformado e não é transportado.

Modo de funcionamento

Na Figura 2.23 apresenta-se um esquema do modo de funcionamento do algoritmo *Fault Parallel Flow*.

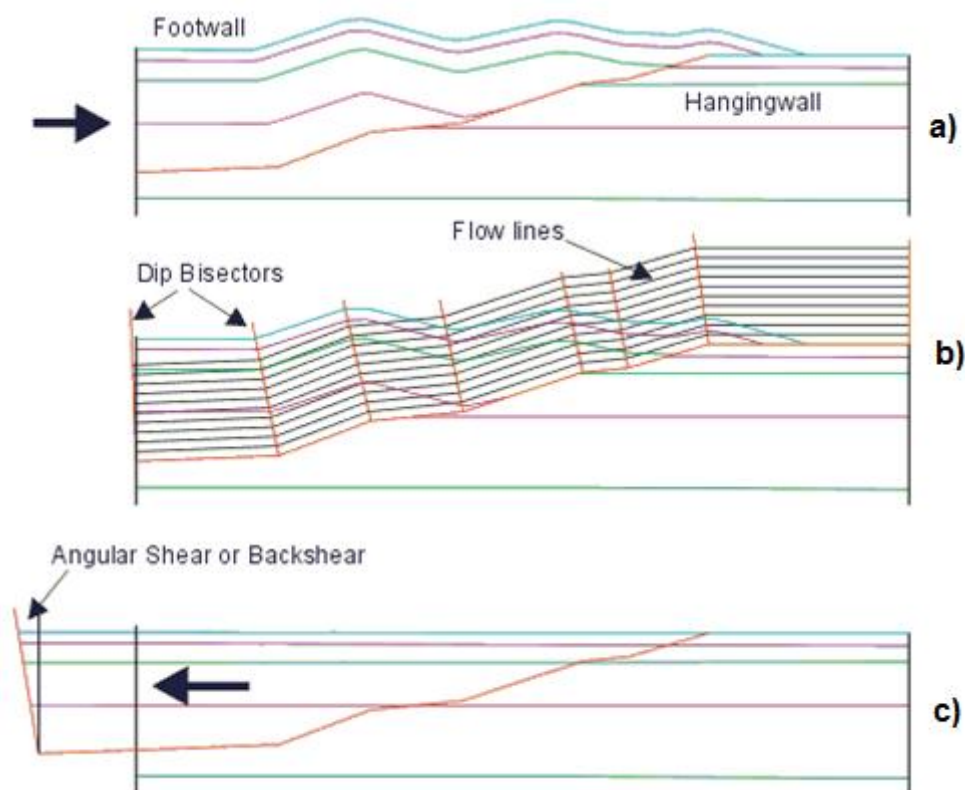


Figura 2.23 – Esquema ilustrativo do modo de funcionamento do algoritmo *Fault Parallel Flow*; a) antes de ser aplicado o algoritmo; b) com as linhas de fluxo (a preto) e os bissectores (a vermelho) que serão utilizados pelo algoritmo na *restauração*; c) secção restaurada.

Na Figura 2.23a mostra-se o estado inicial com a geometria actual. Na Figura 2.23b estão marcadas as linhas de fluxo (a preto) ao longo das quais os nós do tecto da falha serão transportados. Estas linhas são construídas de acordo com os bissectores de inclinação (a vermelho), que dividem em segmentos inclinados, os horizontes que serão movidos. Na Figura 2.23c utiliza-se um determinado cisalhamento angular (cisalhamento homogéneo da linha do *pin*) de modo a manter o comprimento das linhas e as áreas quando se aplica o algoritmo.

A caixa de ferramentas *Fault Parallel Flow*

A caixa de ferramentas que corresponde ao algoritmo *Fault Parallel Flow* (Figura 2.24) abre-se a partir do menu das restaurações. Antes de ser executado o algoritmo e após ter sido definida a falha que será restaurada, podem ser visualizados os bissectores de inclinação dominantes na falha (a vermelho, Figura 2.23 b).

Na caixa de ferramentas (Figura 2.24), os objectos a serem movidos correspondem a todas as camadas e falhas do tecto da falha e que se pretendem transportar ao longo da falha seleccionada, que deverá ser adicionada ao campo de “falha”. De modo a alargar a deformação modelada para além do comprimento da falha, utilizam-se extensores de falha automáticos, onde é possível o controlo da sua inclinação nas extremidades da falha. Os extensores automáticos nas zonas de cavalgamento e dobramento são geralmente orientados paralelamente aos planos horizontais.



Figura 2.24 – Caixa de ferramentas do *Fault Parallel Flow*.

Tal como no algoritmo *Inclined Shear*, pode-se restaurar uma falha utilizando três métodos que controlam a deslocação das camadas do tecto da falha: deslocamento a um nível, junção de camadas ou movimentação entre pontos.

É possível definir o número de passos que se pretende visualizar, até à *restauração* final. Esta opção permite a visualização da deformação ao longo da *restauração*, dividindo a movimentação total em componentes com igual quantidade de deslocamento e mostrando cada passo.

Existe na caixa de ferramentas uma opção que permite a separação da secção pela falha ao longo da qual se pretende que ocorra o movimento. Sempre que necessário esta acção deverá ser realizada.

O cisalhamento angular, também conhecido como *backshear/foreshear* ou tensão angular, tal como já foi referido, é o cisalhamento homogéneo na linha do *pin*, utilizado de modo a manter a espessura das camadas constantes. Por convenção, valores positivos de cisalhamento angular correspondem a vectores orientados para a esquerda e valores negativos, a vectores orientados para a direita (Figura 2.25). Esta convenção é independente da direcção de transporte do tecto da falha. A orientação do cisalhamento angular é relativa à orientação da falha, o que significa que um valor de cisalhamento 0 corresponde a uma linha perpendicular à falha.

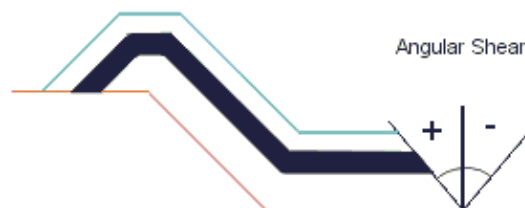


Figura 2.25 – Esquema que representa a convenção de sinal para o cisalhamento angular.

É essencial a selecção de um valor de cisalhamento angular correcto, para se conseguir manter o comprimento da linha e a área das camadas no modelo restaurado (Figura 2.26a e 2.26b). Geralmente é necessário um cisalhamento angular maior nas falhas mais inclinadas, de modo a manter a espessura da camada constante, no tecto da falha.

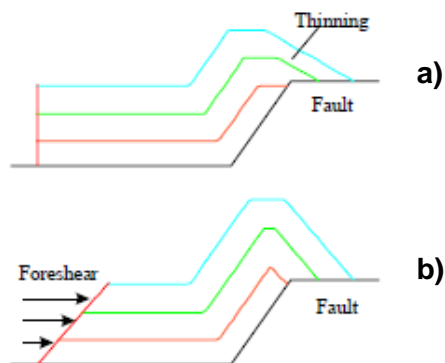


Figura 2.26 – Esquema ilustrativo de uma dobra provocada por uma falha, modelada para a actualidade utilizando o *Fault Parallel Flow*; a) modelação utilizando um valor de cisalhamento angular de 0; b) modelação com a quantidade de cisalhamento angular necessária, de modo a eliminar o estreitamento nas camadas existentes no tecto da falha.

2.5. Construção de camadas

Esta opção permite a construção de camadas a partir de uma camada *modelo* ao longo de bissectores de inclinação. Estas novas camadas podem ser geradas acima ou abaixo da camada *modelo* e segundo um determinado intervalo definido.

Podem-se construir um certo número de camadas de três maneiras distintas utilizando:

- Uma espessura ortogonal constante;
- Um determinado ângulo relativamente à camada *modelo*;
- Uma determinada espessura e ângulo.

Na Figura 2.27 apresenta-se um esquema representativo do modo de funcionamento da função de construção de camadas. As novas camadas (a preto) são construídas usando bissectores de inclinação dominantes (a vermelho), que são projectados a partir da camada *modelo* (a azul).

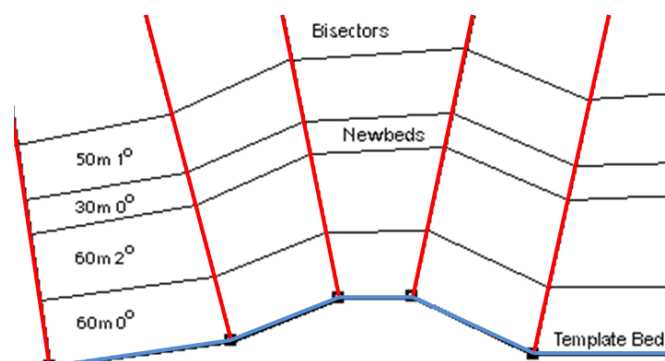


Figura 2.27 – Esquema representativo do modo de funcionamento da função de construção de camadas. A espessura e os ângulos das novas camadas encontram-se à esquerda da imagem.

Na Figura 2.28 apresenta-se um esquema de construção de camadas, utilizando um determinado ângulo. Em primeiro lugar, utilizando os bissetores a partir da camada original, cria-se a primeira camada (Figura 2.28 a). Para a construção da segunda camada, são criados novos bissetores (Figura 2.28 b). Se a nova camada intersectar a camada original, como no exemplo, então é utilizada uma combinação entre os bissetores da nova camada e da camada original na zona de intersecção.

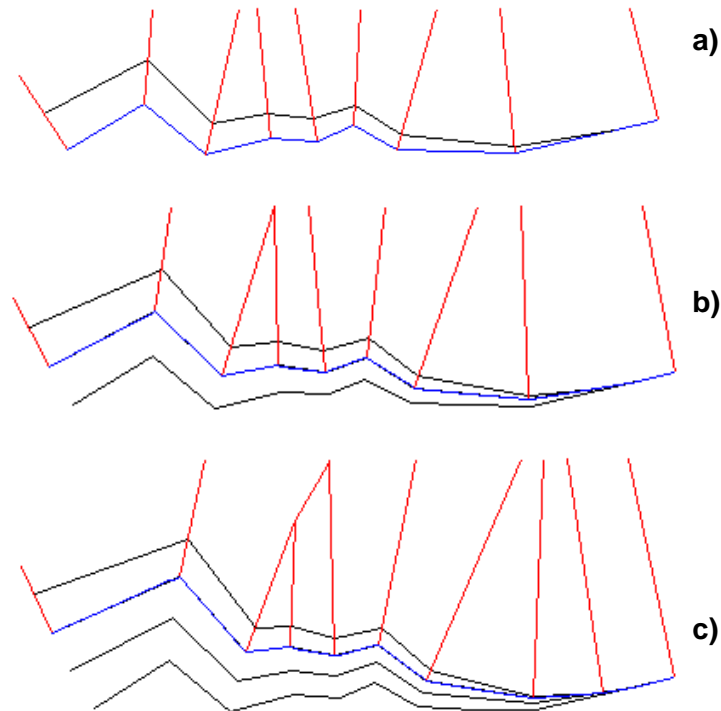


Figura 2.28 – Esquema representativo de construção de camadas utilizando um determinado ângulo; a) construção da primeira camada; b) construção da segunda camada; c) construção de uma terceira camada. Na zona de intersecção das diferentes camadas criadas, é utilizada uma combinação dos bissetores das diferentes camadas.

Espessura da camada

Para efeitos de construção de camadas, a espessura de uma camada pode ser definida como o comprimento de uma normal desenhada num segmento da linha *modelo* até à intersecção com a linha construída (Figura 2.29). A distância medida ao longo de um bissetor entre duas camadas não corresponde à espessura da camada (Figura 2.30).

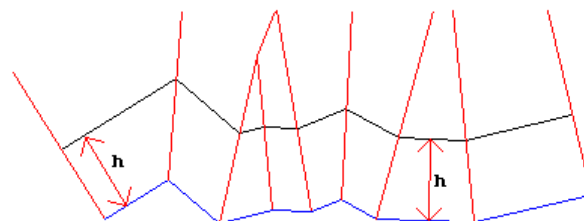


Figura 2.29 – Espessura (h) de uma camada.

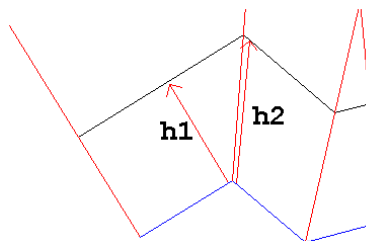


Figura 2.30 – Diferença entre espessura ao longo de um bissector (h2) e espessura da camada (h1).

Quando duas camadas não são paralelas, ou seja, quando é utilizado um determinado ângulo (Figura 2.31), a espessura medida do horizonte 1 (a azul) até ao horizonte 2 (a preto) não é equivalente à espessura medida do horizonte 2 (a azul) até ao horizonte 1 (a preto).

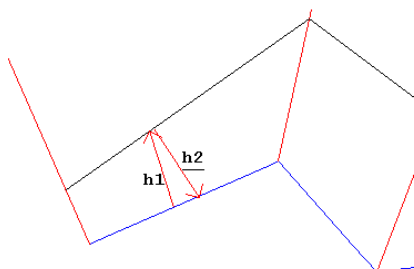


Figura 2.31 – Camada com espessura variável. A espessura h1 medida a partir do topo da unidade azul é distinta da espessura h2, medida a partir do topo da unidade a preto.

Quando se criam camadas utilizando um determinado ângulo, a espessura máxima da camada a criar é a distância correspondente ao ponto de intersecção entre um bissector e a normal ao segmento de linha num determinado ponto (Figura 2.32).

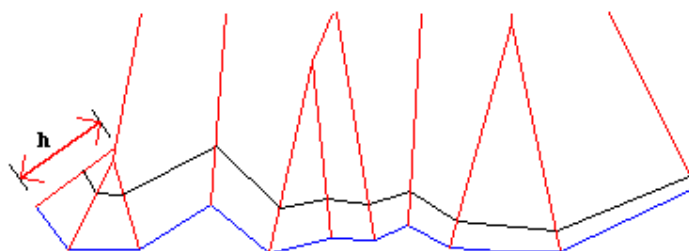


Figura 2.32 – O ponto de intersecção entre uma determinada espessura num ponto e um bissector (a vermelho) corresponde à espessura máxima (h) que pode ser definida acima desse ponto.

Caixa de ferramentas da construção de camadas

A caixa de ferramentas de construção de camadas pode ser acedida a partir do menu das operações (Figura 2.33).



Figura 2.33 – Caixa de ferramentas de construção de camadas.

Na Figura 2.33, a camada a introduzir corresponde à camada modelo que irá ser utilizada para construção da nova camada. É possível definir o número de camadas que se pretende criar a partir da camada modelo. Deverá definir-se a espessura pretendida para a nova camada e caso se pretenda criar a nova camada a partir de um ângulo, esta opção deverá encontrar-se seleccionada, de modo a permitir inserir um ângulo para as camadas a partir da camada modelo. É necessário ainda escolher se a camada que se pretende construir se situará acima ou abaixo da camada modelo. Por último selecciona-se se a camada será construída da esquerda para a direita, ou vice-versa, de modo a controlar a inclinação das camadas que serão construídas.

O modo interactivo permite a actualização contínua de quaisquer alterações nas camadas a serem construídas, quer seja na alteração de parâmetros (ângulo e espessura medida na vertical) quer na alteração de nós na camada *modelo*. Uma vez que se tenha criado a nova camada, podem-se reposicionar os nós da camada modelo (usando a opção de edição). Qualquer alteração realizada na camada modelo, será automaticamente realizada na nova camada construída.

É possível construir as camadas utilizando uma lista que deverá conter as respectivas espessuras verticais e ângulos das camadas a serem construídas. Com esta funcionalidade é possível construir-se uma série de camadas baseadas nos parâmetros especificados na lista, onde estão especificados os nomes dos horizontes, espessura, identidade, cor e outros parâmetros.

Capítulo 3. Alguns exemplos de aplicação do 2DMove

3.1. Sequência Deltaica Progradante

O objectivo principal deste exemplo é efectuar restaurações de secções sísmicas com sequências estratigráficas deposicionais complexas, que tenham sido intensamente afectadas por falhas, de forma a conseguir-se determinar a sua geometria inicial e assim caracterizar o ambiente deposicional e fácies sísmicas. Uma correcta identificação das fácies sísmicas pode ser importante para a identificação de potenciais reservatórios.

São necessárias duas operações principais: uma primeira de *restauração* e uma segunda de modelação até à actualidade. A *restauração* sísmica permite evidenciar a geometria inicial das sequências estratigráficas, cuja identificação não é clara devido ao sistema de falhas que as afecta. Torna-se assim possível uma melhor interpretação dos dados, facilitando a reconstrução do ambiente deposicional e da movimentação do sistema de falhas que o afectou. A modelação a partir da geometria inicial até à geometria actual, permite, não só uma interpretação mais correcta da história geológica da região, como também uma previsão da existência de potenciais reservatórios siliciclásticos e a identificação das suas relações com os blocos de falhas e de potenciais armadilhas.

Em primeiro lugar será efectuada uma interpretação da secção e a construção do respectivo modelo, de modo a permitir o manuseamento da imagem. Seguidamente, restaurar-se-á a secção de modo a remover a inclinação das estruturas e o rejeito das falhas. A partir desta geometria restaurada, conseguir-se-á identificar as estruturas deposicionais originais, sendo assim possível interpretar o respectivo ambiente de deposição. Irá concluir-se este exemplo com a modelação da secção até à sua geometria actual.

3.1.1. Importação da secção no programa 2DMove

Para a importação da secção no programa, começa-se, em primeiro lugar, por abrir um novo mapa. Insere-se, de seguida, a imagem sísmica no mapa utilizando a opção “vertical”, pois trata-se de uma secção. Dimensiona-se devidamente a imagem no mapa, inserindo a sua posição, tendo em conta o seu comprimento (que neste caso é 10000 m). A imagem inserida aparece no mapa representada como uma linha (Figura 3.1).

Após inserir-se a secção sísmica no mapa, grava-se o ficheiro e abre-se a secção sísmica (Figura 3.2). De seguida efectua-se a interpretação da secção sísmica.

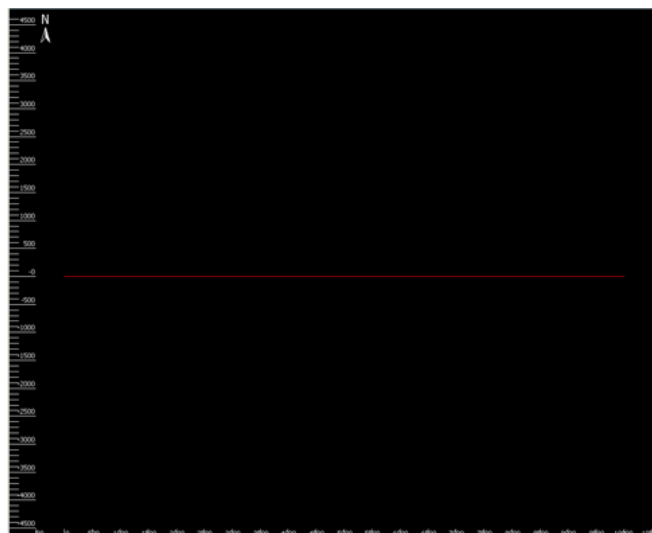


Figura 3.1 – Mapa com a secção inserida na vertical.

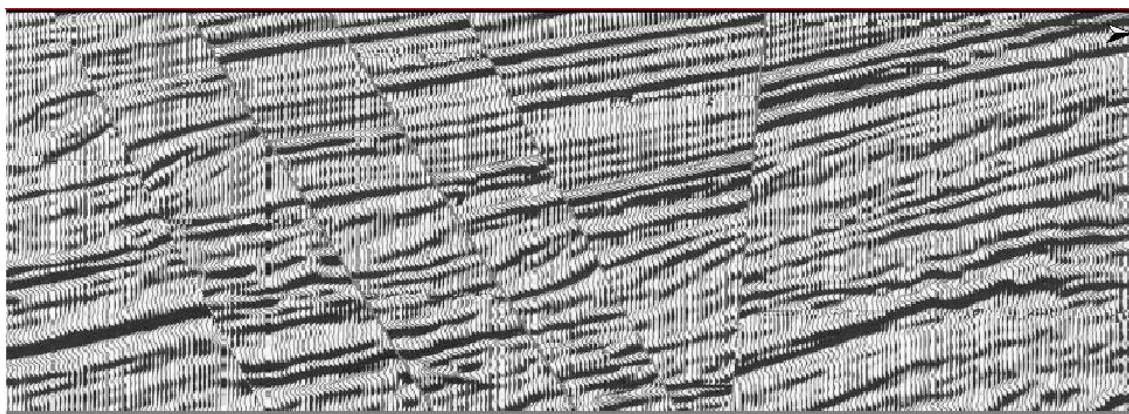


Figura 3.2 – Secção sísmica inserida no 2DMove, sem interpretação.

3.1.2. Interpretação e construção da secção

A interpretação sísmica envolve identificar e desenhar correctamente as falhas e as fronteiras das sequências sedimentares principais.

Começa-se por fazer a interpretação das falhas, desenhando-as na secção, utilizando o método de desenho descrito no Anexo 1, e seleccionando uma cor (a partir da barra de cores. Normalmente é utilizada a cor vermelha na identificação das falhas.

O passo seguinte é a interpretação dos horizontes que separam as unidades sísmicas principais. Seleccionam-se cores para os vários horizontes e traça-se a sua interpretação em cada bloco de falha. Neste exemplo foi seguida a interpretação de falhas e horizontes apresentada no tutorial do programa. Caso seja necessário rectificar ou corrigir alguma linha, podem-se utilizar as funções de edição presentes no 2DMove.

A nova secção interpretada está representada na Figura 3.3.

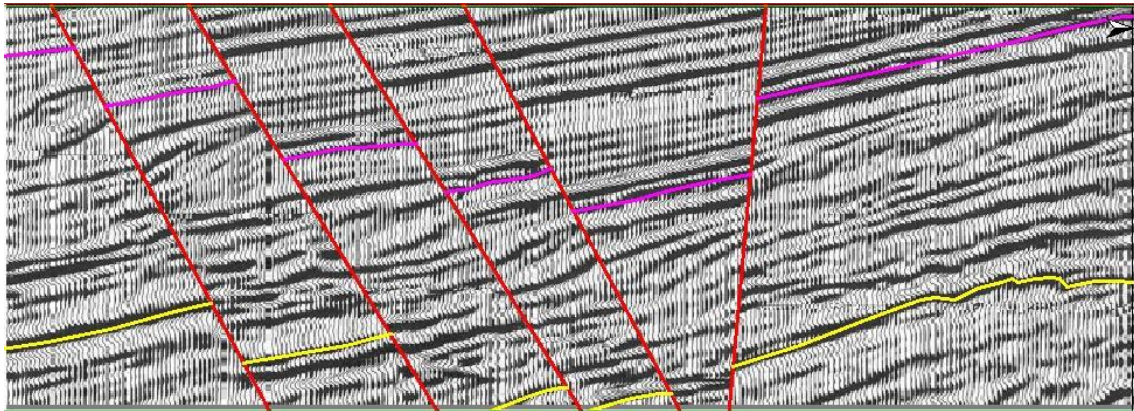


Figura 3.3 - Secção interpretada no 2DMove.

A secção interpretada ainda não está pronta para ser manipulada. De modo a poder efectuar-se a sua *restauração* é necessário primeiro construir a secção. A *construção* da secção envolve:

- 1) Atribuir propriedades às linhas interpretadas;
- 2) Delimitar a secção sísmica;
- 3) Estender e terminar as linhas;
- 4) Definir um determinado intervalo de nós para cada linha;
- 5) Criar polígonos fechados, que irão corresponder às unidades estratigráficas em cada bloco de falha. Estes polígonos serão usados para definir as diferentes áreas da imagem, de modo a poder realizar-se o movimento dos diferentes blocos durante a *restauração* e a modelação até à actualidade da secção.

Apresenta-se de seguida a descrição detalhada de cada passo de construção da secção.

Depois de interpretadas as falhas e os horizontes, devem ser-lhes atribuídas as suas respectivas propriedades. Isto inclui definir as linhas de falha como falhas e associar nomes aos horizontes, atribuindo uma designação às linhas que definem o topo de cada sequência. Neste caso, tendo em conta a Figura 3.3, foram definidas todas as linhas amarelas como o topo da sequência 1 e todas as linhas rosa como o topo da sequência 2.

Para delimitar a secção sísmica, é necessário construir-se dois “postes” verticais nos extremos laterais da secção e desenhar-se duas linhas horizontais de modo a definir os limites da secção.

De seguida, estendem-se e terminam-se as linhas criadas anteriormente. Ao realizar esta operação deve-se verificar se todas as linhas se encontram seleccionadas. Caso algumas linhas não estejam a ser correctamente estendidas, repete-se a operação, aumentando a percentagem de extensão. Estas alterações deverão agora ser gravadas no mesmo ficheiro de secção que se estava a trabalhar.

O próximo passo será redefinir o intervalo de nós existentes em cada linha criada. Neste caso, redimensionam-se os nós das linhas uniformemente, em intervalos de 50 m. Esta

operação permite aumentar a resolução na interpretação do perfil e, embora não seja essencial, pode ajudar a evitar anomalias quando se estiver a modelar as estruturas.

O último passo na construção da secção é o de criar polígonos. Estes podem ser criados manualmente ou automaticamente. Quando se usa o modo automático, nem sempre todos os polígonos ficam correctamente definidos. Estes últimos deverão ser apagados e, caso não se consiga criá-los de forma automática, terá que se recorrer à forma manual. No Anexo 1, encontra-se descrita toda a informação necessária para criar polígonos, tanto de forma automática como manual.

Concluída a construção da secção (Figura 3.4) ficam definidos os polígonos correspondentes às várias unidades interpretadas, em cada bloco de falha. A secção encontra-se agora pronta para ser manipulada. Em primeiro lugar irá efectuar-se a *restauração* dos blocos.

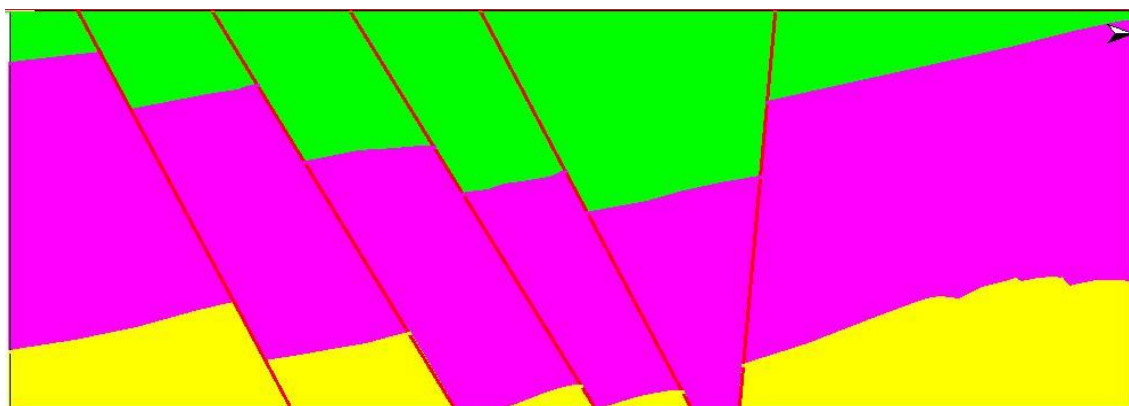


Figura 3.4 - Dados interpretados, secção construída e pronta para a manipulação.

3.1.3. Restauração da secção

A operação de *restauração* envolve, neste caso específico, o deslocamento e a rotação dos blocos. Trata-se assim, de uma *restauração* simples.

De modo a acelerar o processo de *restauração*, a resolução da imagem pode ser reduzida. Isto permite que se realizem mais rapidamente as operações na imagem de baixa resolução, até que se obtenha a solução pretendida. Após a selecção dos parâmetros adequados na *restauração*, esta deverá ser repetida, utilizando a imagem com a resolução total.

No início do processo de *restauração*, na caixa de ferramentas das restaurações sísmicas, começa-se por tornar os polígonos invisíveis e seleccionar-se a imagem. A sua resolução deve ser reduzida para 50%. Enquanto se estiverem a realizar as operações de *restauração* e de modelação até à actualidade, a caixa de ferramentas deverá manter-se sempre aberta.

O processo de *restauração* é iniciado, ao seleccionar-se o bloco de falha mais à direita, utilizando uma das ferramentas de selecção (Figura 3.5). Este será o primeiro bloco a ser

restaurado e será movido de modo a juntar os limites do topo da sequência 2 (a rosa), de modo a manter a continuidade da sequência entre os dois blocos de falha. O resultado desta operação pode ser observado na Figura 3.6.

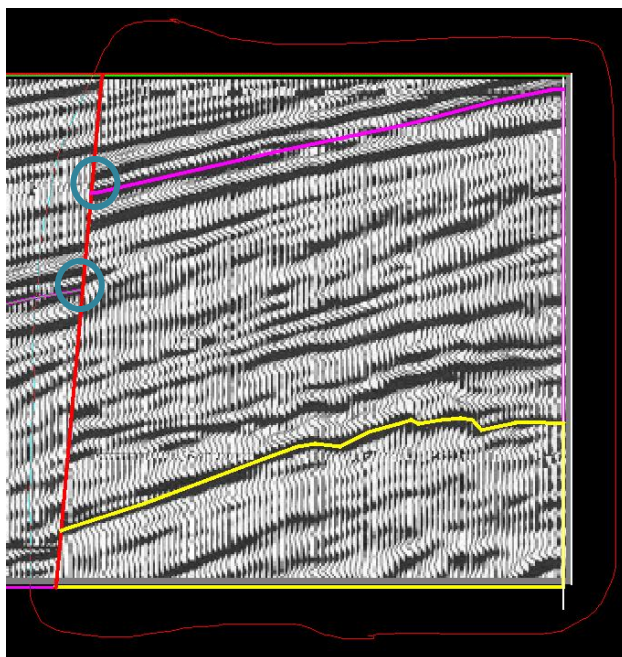


Figura 3.5 - Bloco seleccionado e pronto a ser movido. O muro da falha deverá ser movido ao longo da falha, de modo a juntar os dois horizontes correspondentes ao topo da sequência 2.

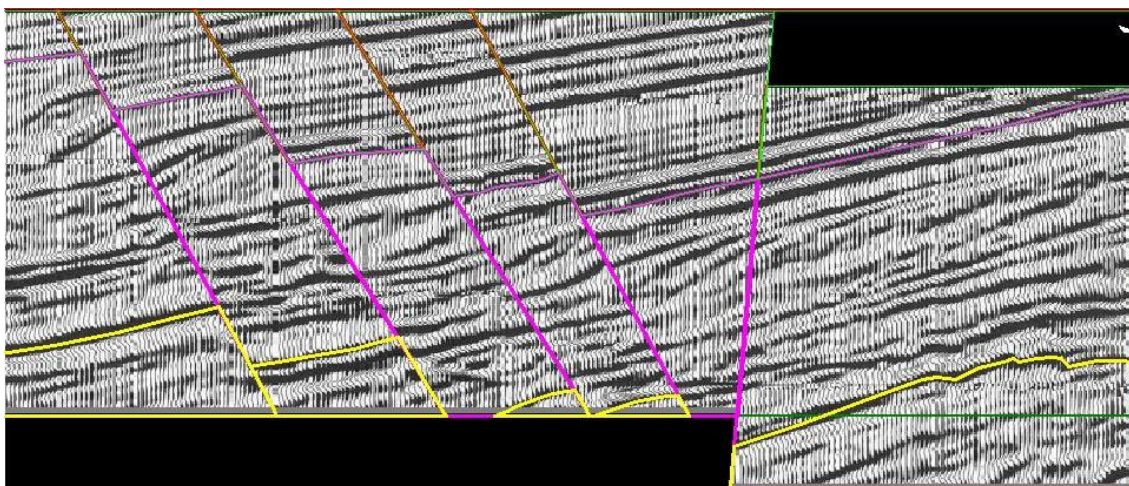


Figura 3.6 - Primeiro passo da *restauração* após a movimentação do bloco da direita.

O passo seguinte corresponde à remoção da inclinação existente nas sequências sedimentares. Em primeiro lugar, mede-se o ângulo de inclinação, criando uma linha paralela ao horizonte restaurado da sequência 2. A barra existente na base da janela do 2Dmove indica o ângulo de inclinação da linha ($-12,2^\circ$, neste exemplo). Esta linha auxiliar pode agora ser apagada. Insere-se uma origem no canto superior esquerdo da imagem, seleccionam-se todos os objectos e transforma-se a imagem, realizando uma rotação de

-12,2°. Deste modo, a imagem roda e o topo da sequência 2 fica aproximadamente horizontal (Figura 3.7).

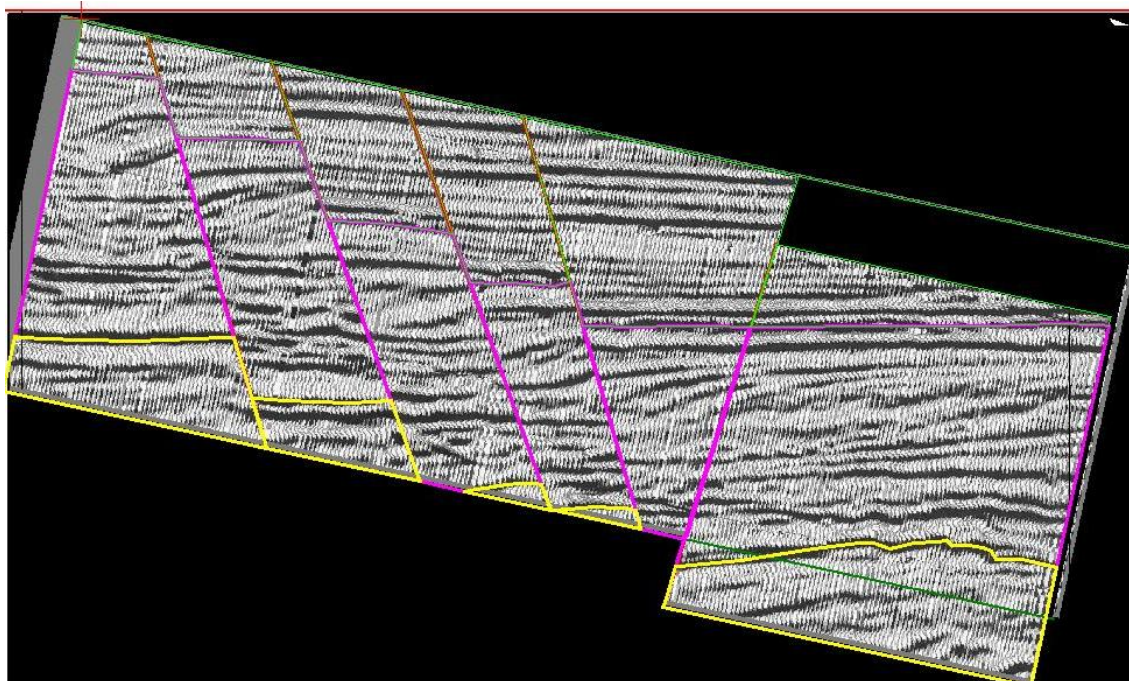


Figura 3.7- Segundo passo da *restauração*, após a remoção da inclinação do bloco.

Para concluir, realiza-se a *restauração* dos restantes blocos da secção. Para o efeito, é necessário repetir, para cada bloco, os passos de selecção e movimentação dos objectos, até que o topo da sequência 2 seja uma linha aproximadamente horizontal e contínua ao longo de toda a secção.

No total serão necessários mais quatro passos na *restauração*. Recorda-se que na caixa das restaurações sísmicas, a imagem necessita sempre de ser seleccionada de modo a que as operações sejam aplicadas tanto à imagem como aos objectos e recordar sempre de diminuir a resolução da imagem, antes de cada passo de restauração e posteriormente aplicar as alterações a toda a imagem, de modo a recuperar a sua resolução original.

Devem ser criadas novas secções a cada passo da *restauração* (Figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11), guardando-as sempre no mapa criado.

A secção restaurada, apresentada na Figura 3.11, evidência uma assinatura sísmico-estratigráfica mais detalhada, o que permite distinguir claramente uma sequência deltaica progradante, que poderá corresponder a um potencial reservatório. Sem a *restauração*, a geometria interna da sequência dificilmente seria identificada. Assim, pode-se propor um modelo deposicional e definir o potencial reservatório.

No final da *restauração*, caso necessário, pode-se ajustar a interpretação das fronteiras das sequências.

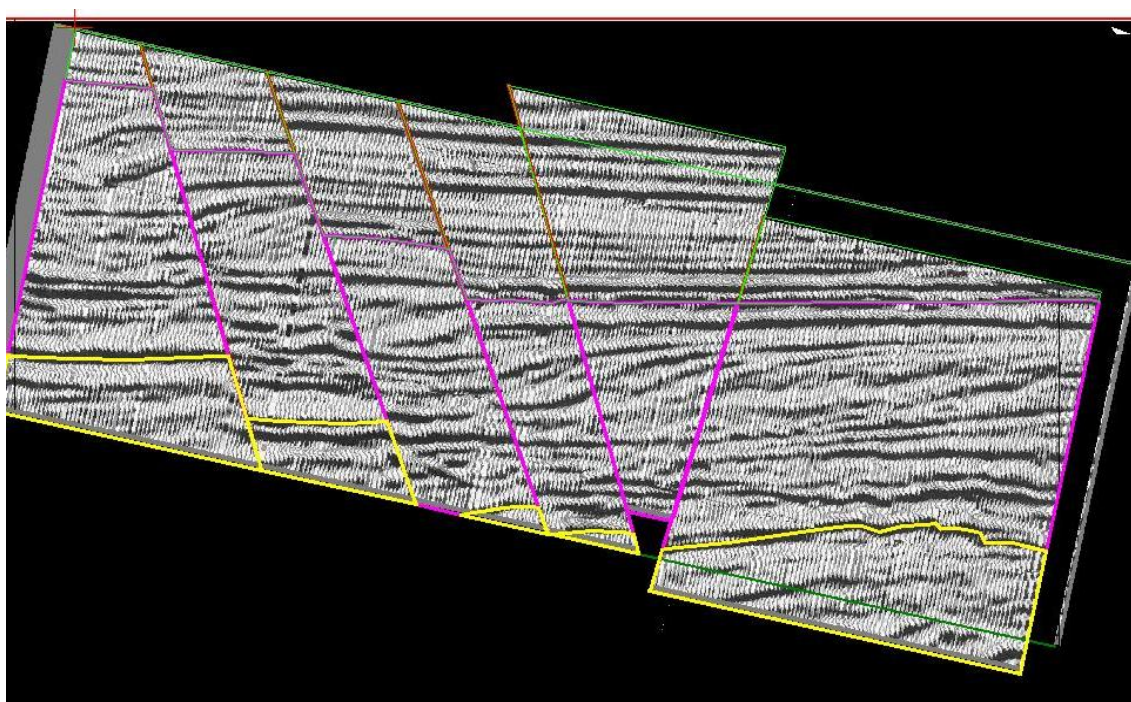


Figura 3.8 – Terceiro passo na *restauração*.

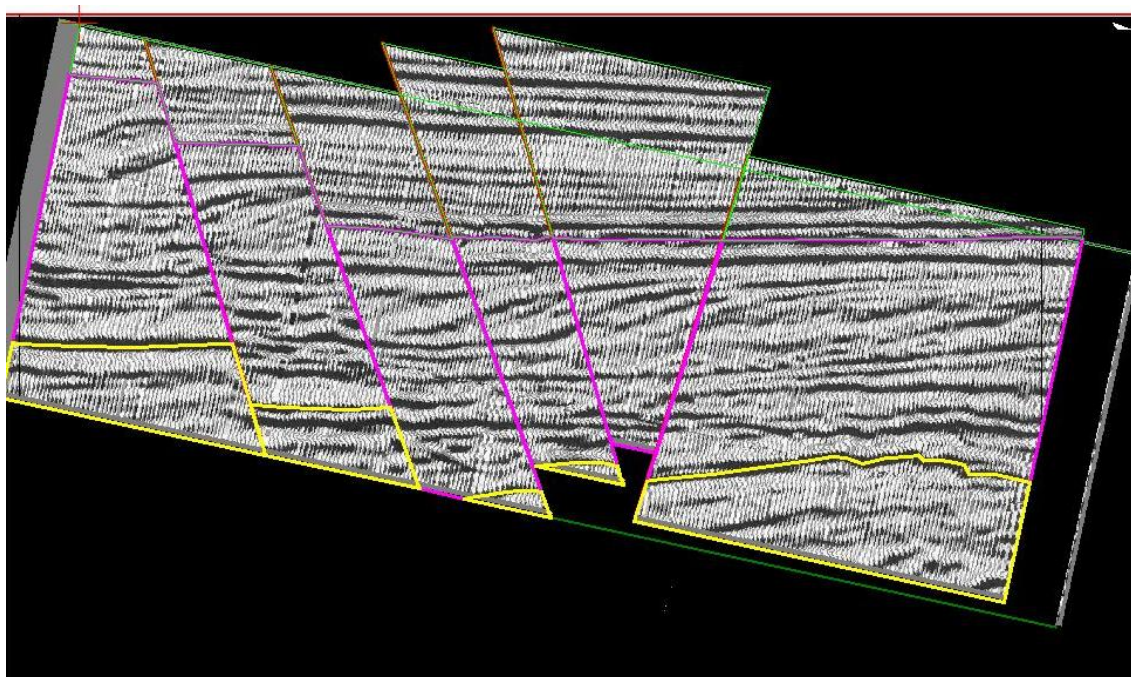


Figura 3.9 – Quarto passo na *restauração*.

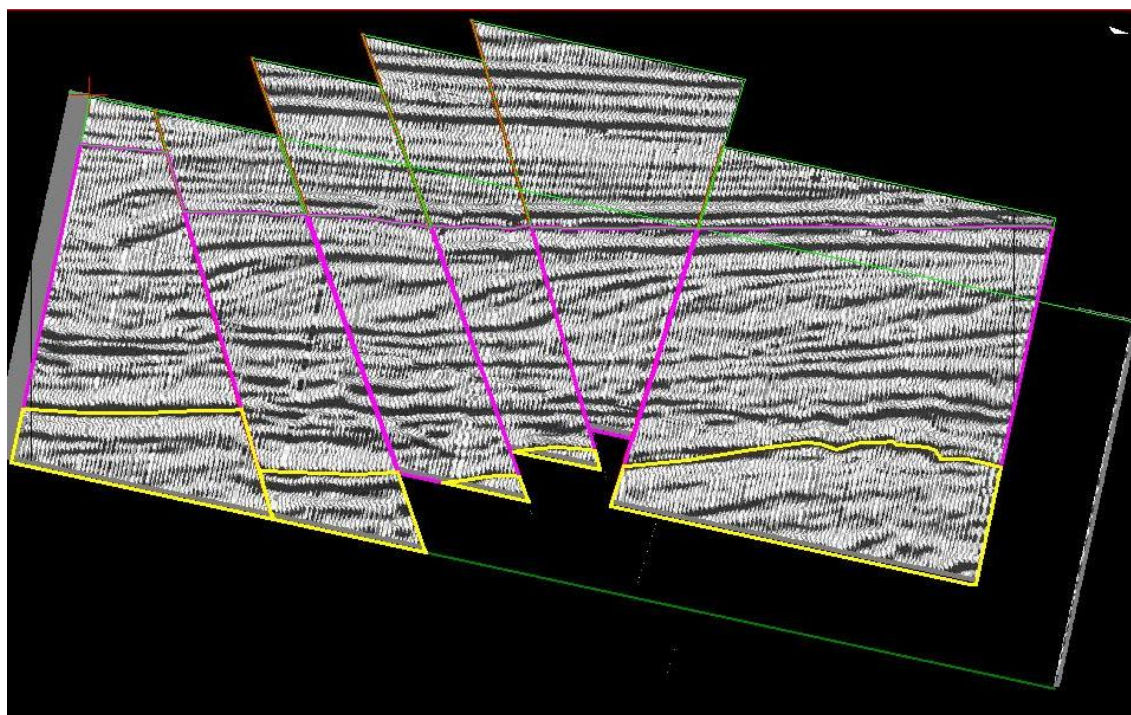


Figura 3.10 – Quinto passo na *restauração*.

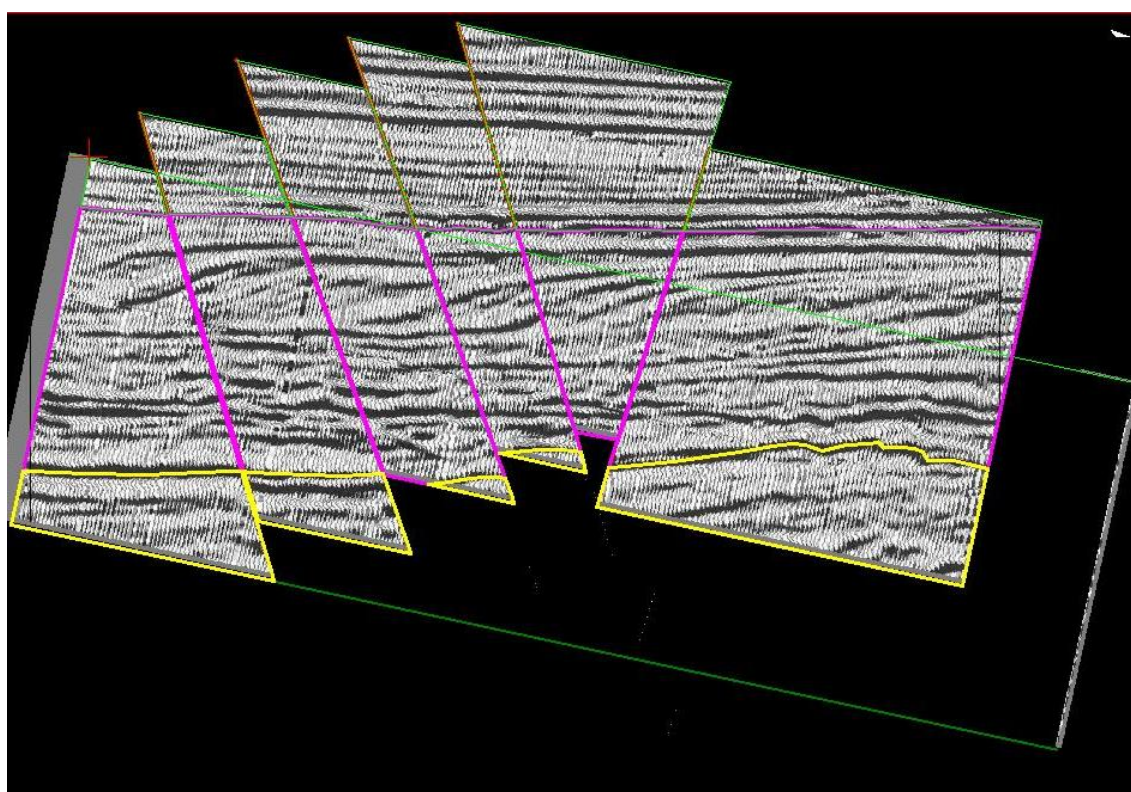


Figura 3.11 – Modelo final restaurado.

3.1.4. Delimitação de um potencial reservatório

Nesta etapa, realiza-se a interpretação dos reflectores correspondentes à progradação e aos limites do reservatório. Depois, as linhas criadas serão separadas pelas falhas, de modo a ser possível a manipulação da secção construída e da imagem.

Em primeiro lugar, desenham-se os reflectores correspondentes à progradação, seleccionando as cores necessárias e usando o tutorial do programa como guia para a interpretação. Na Figura 3.12 pode-se observar a secção com a interpretação da assinatura sísmico-estratigráfica desenhada.

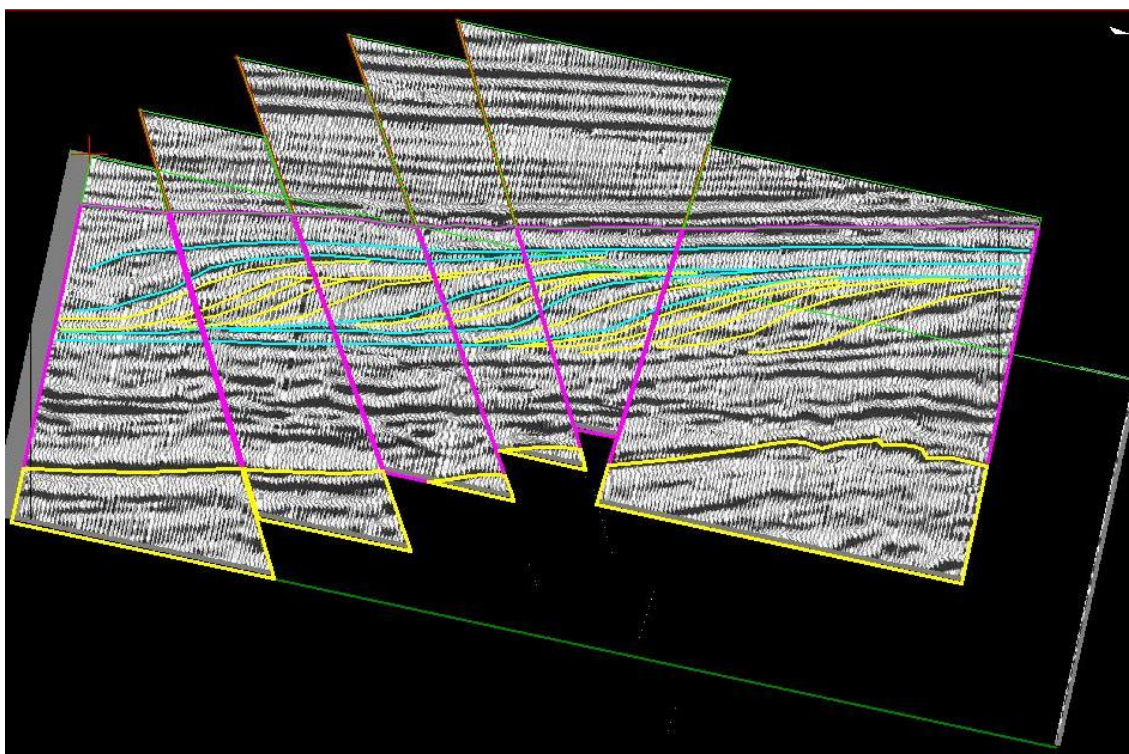


Figura 3.12 – Interpretação da assinatura sísmico-estratigráfica, onde se observa claramente uma sequência progradante. As linhas azuis correspondem aos reflectores mais fortes.

Para a delimitação do possível reservatório de areias, desenham-se duas linhas vermelhas que definam os limites superior e inferior do potencial reservatório, usando como auxílio a interpretação presente no tutorial do programa (Figura 3.13).

De modo a modelar o modelo de acordo com a geometria actual, as linhas interpretadas em cada bloco de falha, devem poder ser movidas independentemente. Para isso, as linhas têm que ser interrompidas nas falhas, o que é realizado utilizando a função de separação, até que cada bloco de falha possua o seu próprio conjunto de linhas correspondentes às sequências progradantes e ao limite do reservatório de areia.

O modelo encontra-se assim pronto para ser modelado até à sua geometria actual.

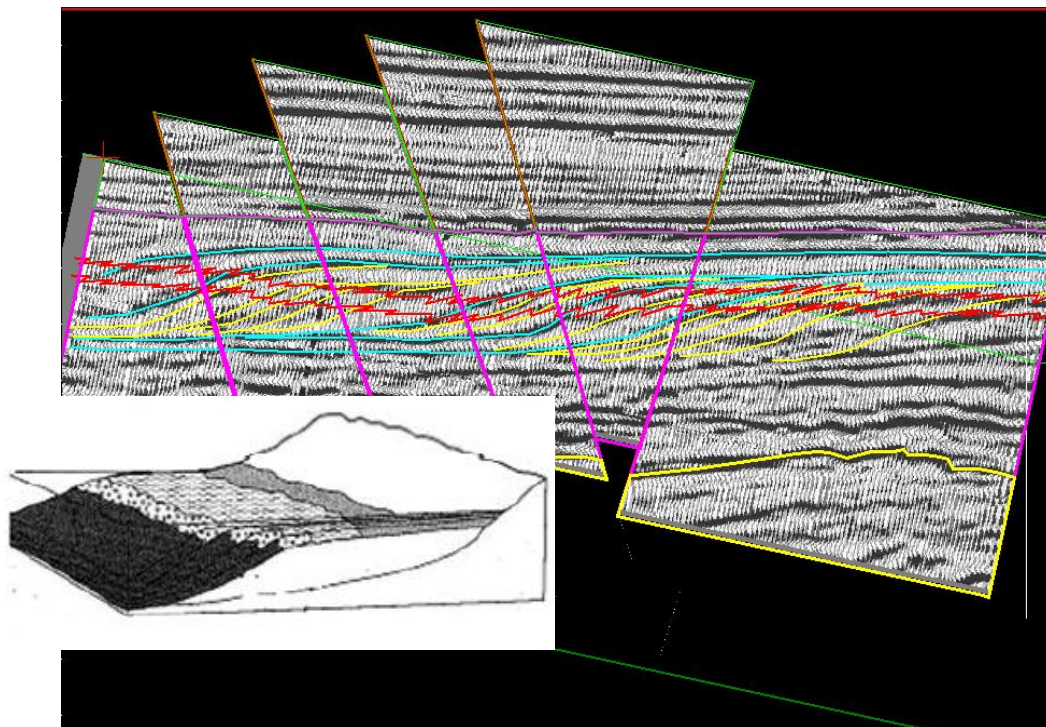


Figura 3.13 - Reservatório de areias definido na secção restaurada e respectivo modelo deposicional. As linhas vermelhas representam os limites do potencial reservatório.

3.1.5. Modelação para a geometria actual

A modelação do perfil para a geometria actual requer novamente a movimentação dos blocos de falha, passo a passo, na ordem inversa à realizada na *restauração*.

Para isso, seleccionam-se todos os blocos, com excepção do bloco mais à esquerda e procede-se à sua movimentação empregando a mesma técnica utilizada anteriormente para a *restauração*. Move-se o topo da sequência 1 (a verde) no tecto da falha até que coincida com o respectivo topo do muro (Figura 3.14).

Seguidamente, repete-se este procedimento até a movimentação de todos os blocos estar completa, com a excepção do bloco mais à direita e guardando sempre o modelo a cada passo. Antes de se proceder à movimentação do bloco mais à direita, deverá ser reposta a inclinação original das sequências. Os resultados obtidos a cada passo da modelação até à actualidade encontram-se nas Figuras 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18.

Quando apenas faltar a movimentação do último bloco (Figura 3.17), reinsere-se a inclinação actual das sequências (correspondente a 12.2°), usando o mesmo procedimento realizado anteriormente durante a *restauração*, quando se removeu a inclinação. O resultado pode ser visualizado na Figura 3.18.

Por fim, o último bloco é seleccionado e movido como descrito anteriormente (Figura 3.19).

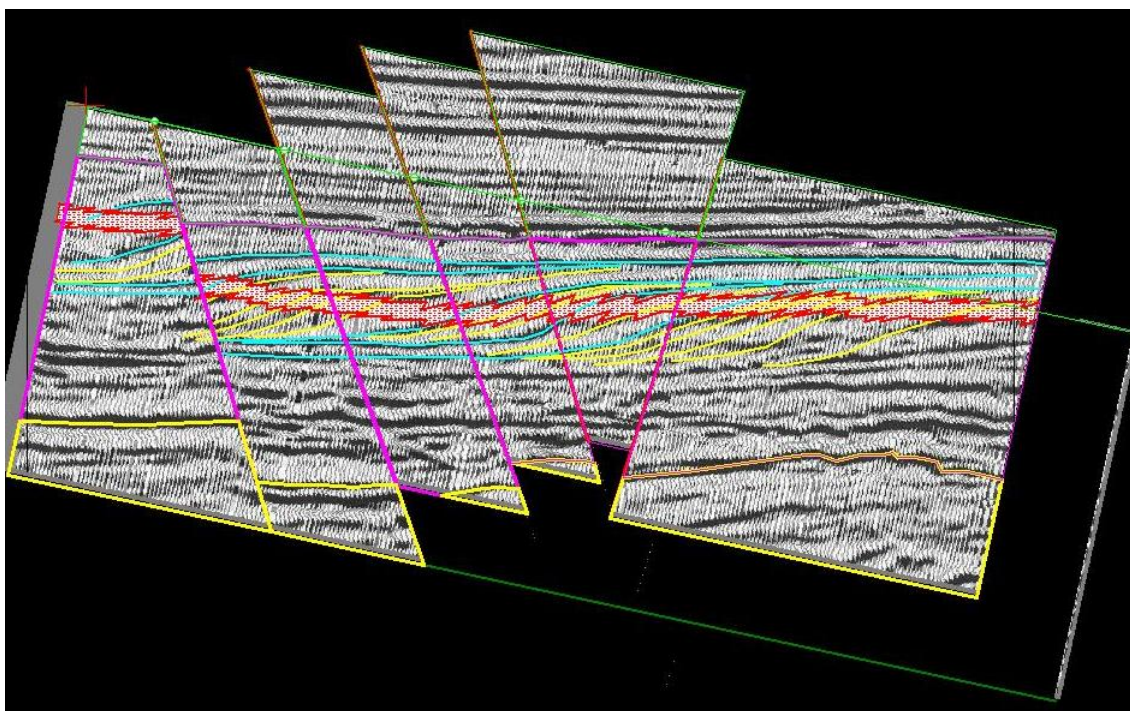


Figura 3.14 – Secção sísmica após ter sido efectuado o deslocamento da falha da esquerda (primeiro passo na modelação da secção).

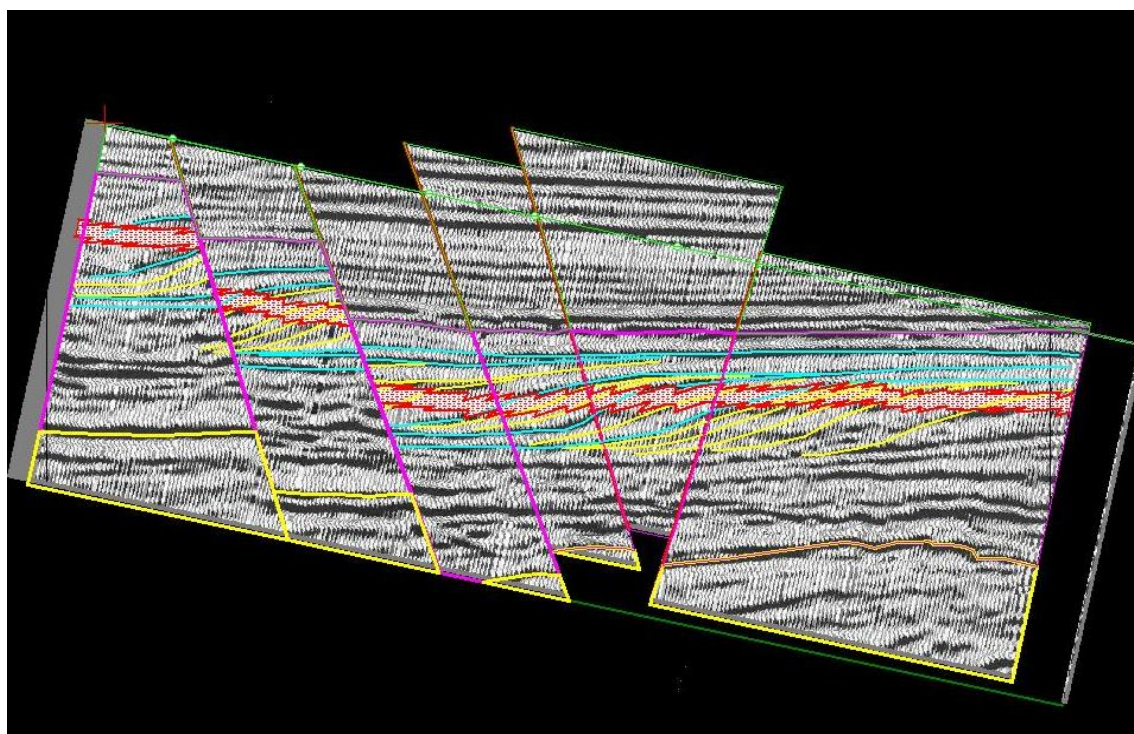


Figura 3.15 – Segundo passo da *modelação*.

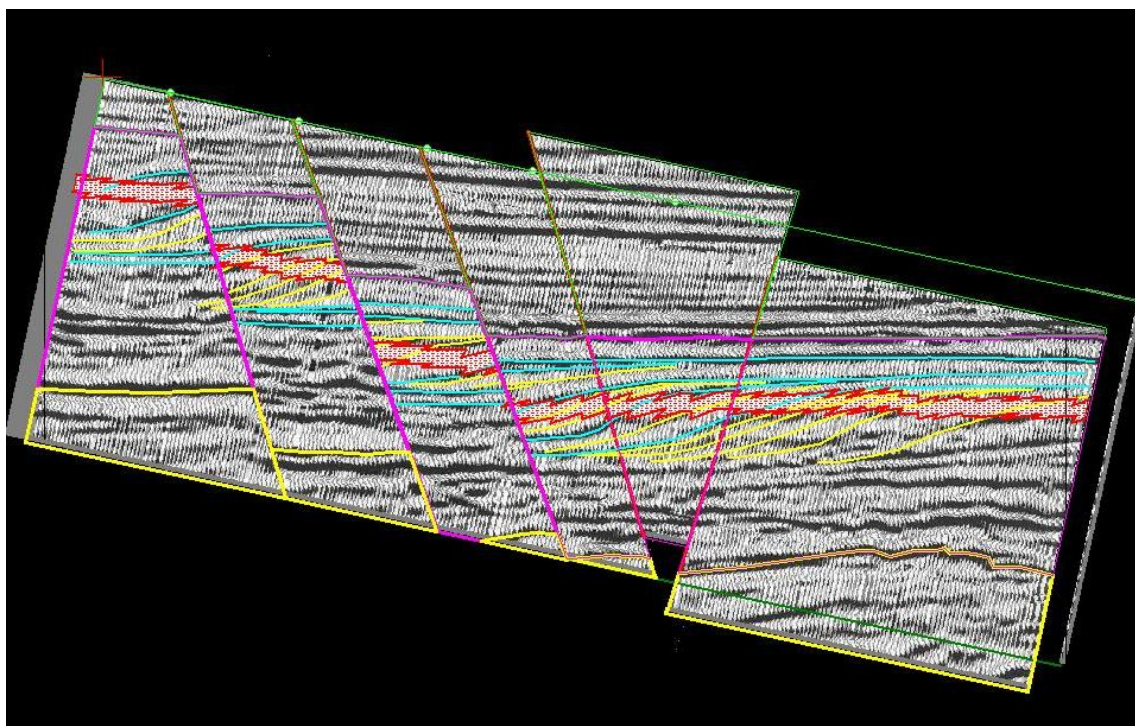


Figura 3.16 - Terceiro passo da *modelação*.

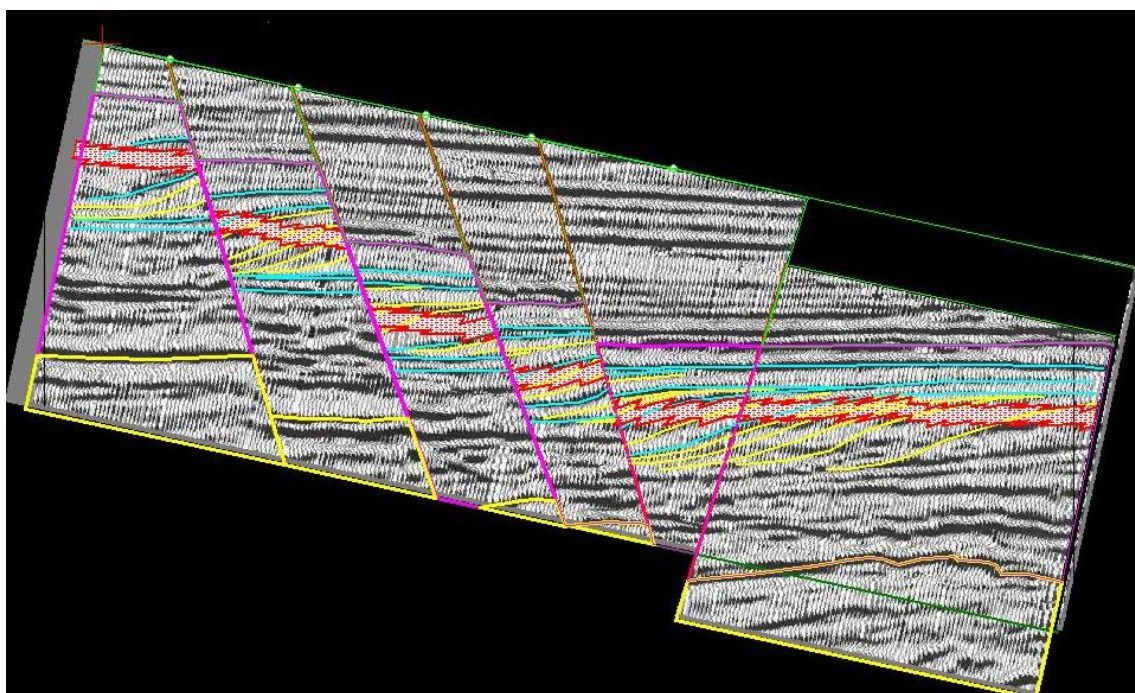


Figura 3.17 - Quarto passo da *modelação*.

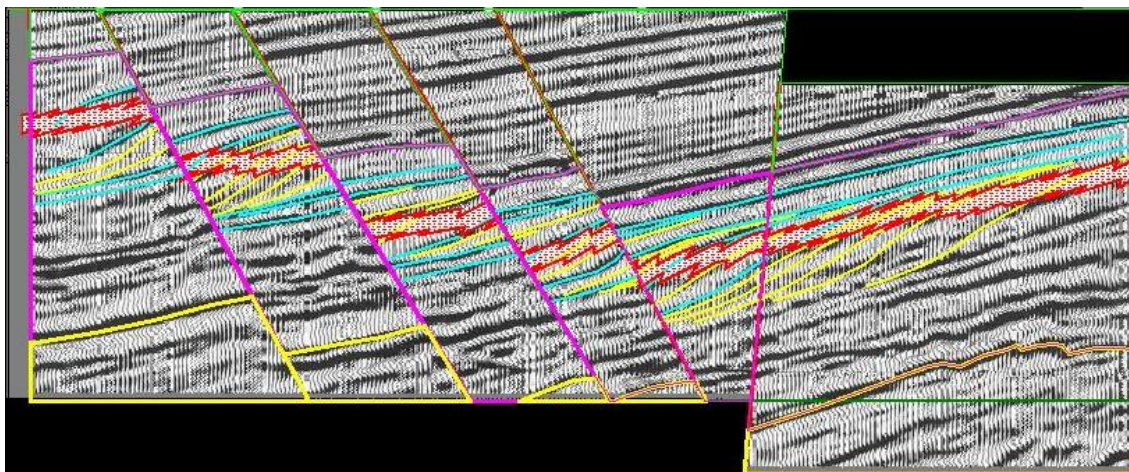


Figura 3.18 - Quinto passo da modelação. Modelo com a actual inclinação das sequências.

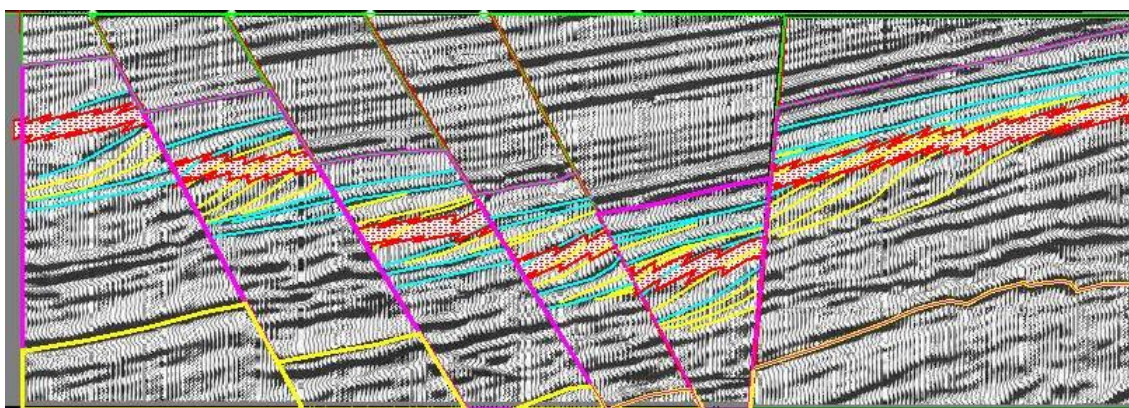


Figura 3.19 – Modelo deposicional interpretado e modelado até à geometria actual.

3.1.6. Comentários finais

Uma vez interpretado o modelo deposicional, é possível visualizar a localização do potencial reservatório em cada bloco de falha. Na geometria actual, as fácies do reservatório interpretado estão completamente isoladas em cada bloco de falha e não existe justaposição dos reservatórios.

Quando se restaura toda a secção (Figura 3.11), pode-se reparar que existe uma má interpretação do horizonte do topo da sequência 3 (a amarelo) nos blocos centrais. O risco associado a esta má interpretação é baixo, pois não possui qualquer impacto no modelo do potencial reservatório.

3.2. Estrutura de *rollover* no Louisiana

O objectivo principal deste exemplo é realizar o *backstripping* de secções sísmicas onde se observem camadas afectadas por falhas lítricas (Figura 3.20), de modo a facilitar o

estudo das relações temporais entre a movimentação nas falhas e a deposição das diferentes camadas. O *backstripping* é um processo que envolve, não só a *restauração* de camadas afectadas por falhas, mas também a sua *descompactação*. Na maior parte das vezes, a sequência mais superficial não apresenta nenhum tipo de deformação, sendo por isso desnecessária a sua *restauração*. Nestas circunstâncias, inicia-se o processo de *backstripping* com a remoção da sequência superficial e a *descompactação* das sequências subjacentes, como será o caso deste exemplo em específico (Figura 3.20).

Tal como no exemplo anterior, após se inserir a secção no programa é necessário proceder-se à uniformização de unidades, pois a escala vertical presente na secção sísmica encontra-se em segundos enquanto que no programa a escala vertical está inicialmente definida em metros. Para isso define-se no programa que a secção está em tempo e ajusta-se a escala vertical da secção à escala pré-definida no programa. Seguidamente desenham-se os reflectores que já se encontram interpretados na própria secção sísmica importada e constrói-se a secção para que a imagem possa ser posteriormente manipulada. Como a secção se encontra em tempo e para que se possa visualizar o aspecto que a secção teria realmente em profundidade terá que se realizar uma conversão em profundidade. Após esta etapa, retira-se a camada situada mais à superfície, descompactando a secção, e restaura-se a camada subjacente, eliminando o rejeito da falha. Para isso, utiliza-se o algoritmo de *descompactação* e um algoritmo de *restauração* de falhas (o *Inclined Shear*), respectivamente. Este processo deverá ser repetido as vezes necessárias até à *restauração* da camada pretendida.

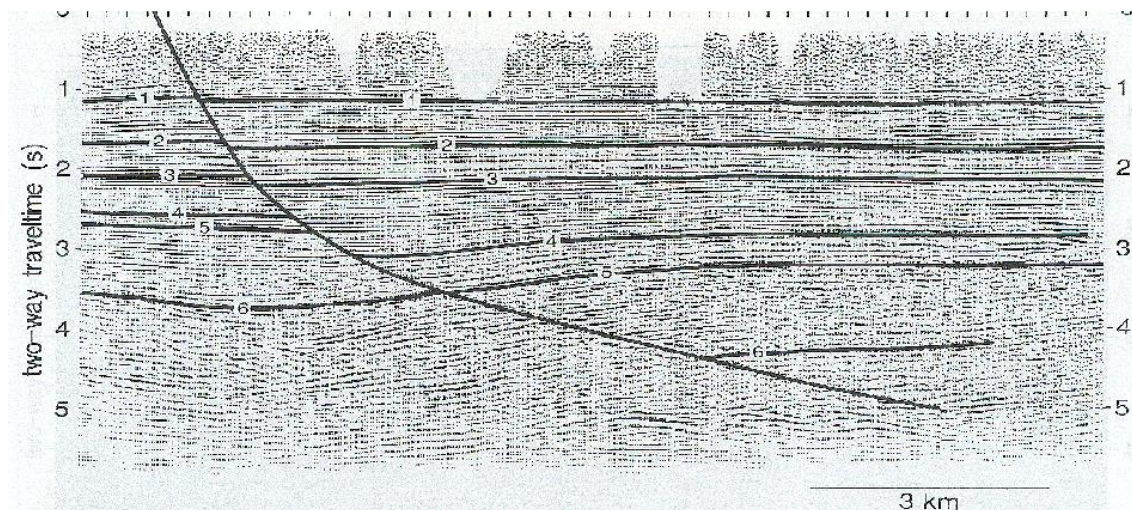


Figura 3.20 – Secção sísmica em estudo com interpretação sobreposta. Esta interpretação foi realizada por Xiao e Suppe (1992).

Neste exemplo, irá ser efectuada o *backstripping* da secção sísmica da Figura 3.20, onde se encontra identificado um reservatório (a azul escuro) afectado por uma falha normal lítrica (Figura 3.21).

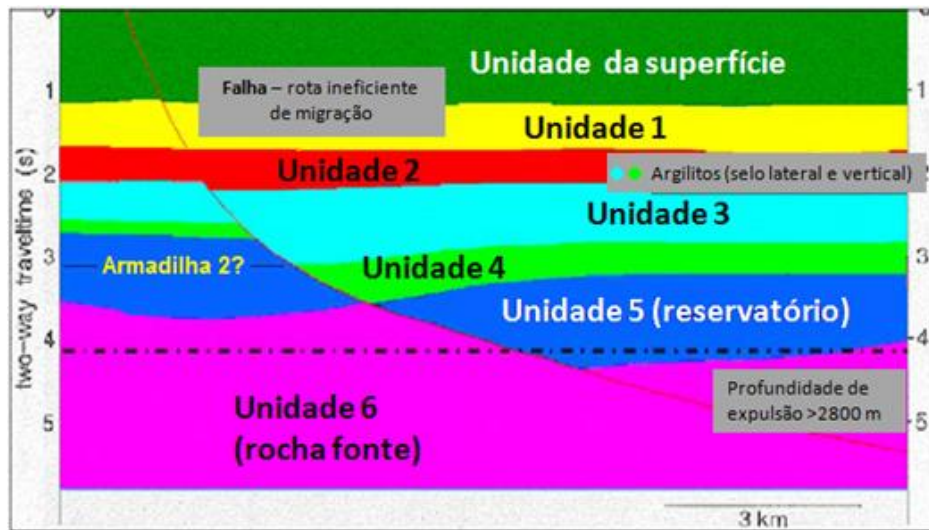


Figura 3.21 – Esquema geral do perfil e das suas principais características.

No tutorial, são também fornecidas as seguintes informações adicionais:

A rocha fonte estende-se até ao topo da unidade 6 (a rosa, na Figura 3.21). A armadilha existente encontra-se associada à falha e o reservatório encontra-se selado horizontal e verticalmente por argilitos (a verde claro e a azul claro na Figura 3.21). Sabe-se também que o momento da expulsão dos fluidos foi contemporâneo da deposição da unidade 3 (a azul claro) e que a profundidade de expulsão foi de aproximadamente 2800 metros de profundidade (linha descontinua na Figura 3.21). Por último, de acordo com o tutorial, a falha constitui um selo pobre a moderado, funcionando como uma rota de migração ineficiente.

Tendo em conta esta informação, irá ser efectuado o *backstripping* da secção, até à *restauração* da camada 3 (a azul claro), pois sabe-se que o tempo de expulsão a partir da rocha fonte (a rosa) ocorreu durante a sedimentação desta camada. Por último, após esta *restauração*, será possível visualizar a justaposição existente no reservatório falhado no momento da expulsão dos hidrocarbonetos, e assim identificar a existência de migração para armadilha existente no muro da falha (armadilha 2, Figura 3.21).

3.2.1. Importação da secção sísmica e dimensionamento da imagem

Para que a imagem sísmica fique devidamente inserida, é necessário que esta fique correctamente dimensionada, tanto na horizontal como na vertical. Para isso, é necessário saber o seu comprimento real e o seu tempo de registo máximo.

Como a imagem sísmica será dimensionada apenas quando for importada, não se definem quaisquer valores ao criar um novo mapa. Insere-se a imagem na vertical, visto que se trata de uma secção, dimensionando-a agora, tendo em conta o seu comprimento, que neste caso é de 14410 metros. A imagem encontra-se agora devidamente dimensionada na horizontal (Figura 3.22).

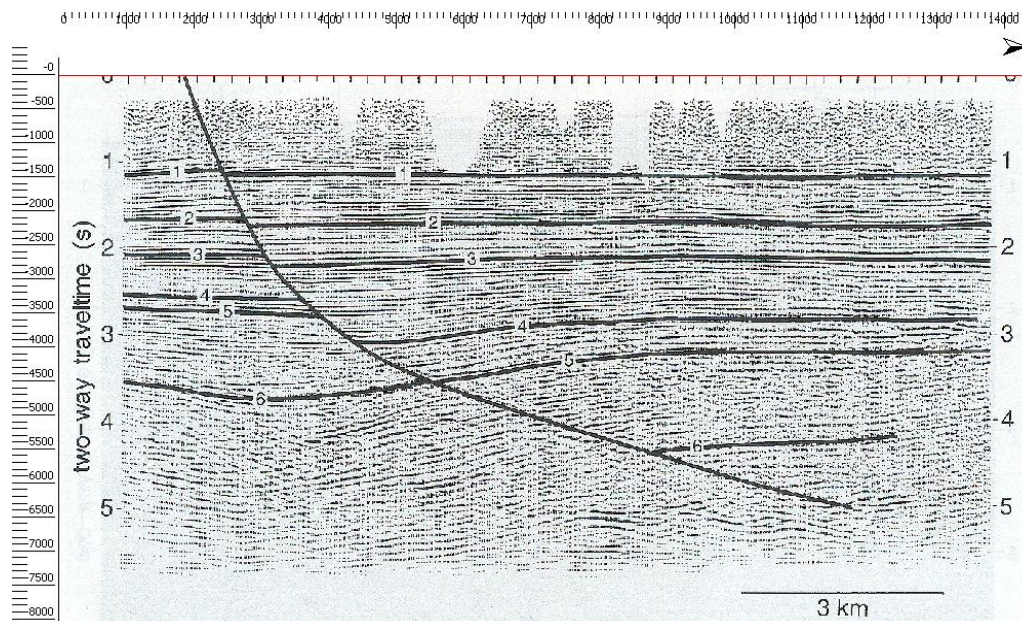


Figura 3.22 – Imagem introduzida ao programa, sem o devido dimensionamento vertical.

No dimensionamento da imagem na vertical é necessário ter especial atenção ao tipo de unidades de escala existentes. Com efeito, a escala vertical da secção sísmica encontra-se em segundos, no entanto a escala vertical no 2DMove está, por definição, em metros (Figura 3.23). Assim, terá de se alterar a escala vertical do programa para segundos. Assim, é possível dimensionar correctamente a imagem, definindo a escala vertical da imagem, tendo em conta que a base da secção se encontra aos 6,36 segundos e o topo aos 0 segundos (Figura 3.20).

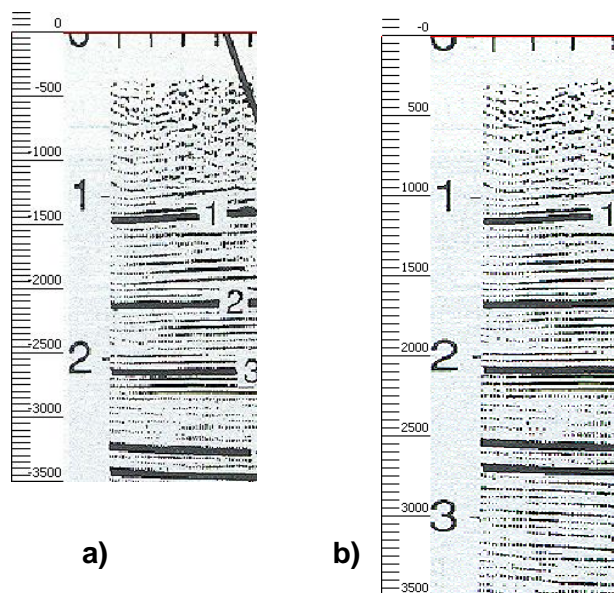


Figura 3.23 – Escalas verticais (do 0 aos 3500 segundos); a) imagem por dimensionar (a escala lateral do programa não se encontra coincidente com a escala vertical da imagem); b) imagem com a escala vertical devidamente dimensionada.

3.2.2. Construção da secção

Para a construção da secção, em primeiro lugar, deverá desenhar-se a linha de falha e os horizontes existentes no perfil, tanto no tecto como no muro da falha, bem como uma linha horizontal no limite superior da secção, correspondente ao tempo 0, que representará o topo da secção (Figura 3.24).

Seguidamente, atribuem-se as propriedades aos objectos criados. Este procedimento facilitará alguns dos passos posteriores, como por exemplo na criação da base de dados, na conversão em profundidade e na *descompactação*. Assim, em primeiro lugar define-se a linha de falha como falha, alterando as suas propriedades, e atribui-se um nome a cada horizonte. Por exemplo, define-se o primeiro horizonte (de cor amarela na Figura 3.24), como horizonte 1 e assim sucessivamente. A linha horizontal no topo da secção corresponde à superfície. Caso já exista uma base de dados, como é o caso, o nome do horizonte pode ser seleccionado a partir de uma lista de nomes retirados da mesma. Tal adicionará à linha seleccionada o conjunto das propriedades do horizonte em questão, que neste caso incluem a velocidade de propagação das ondas sísmicas e a idade de cada horizonte (Tabela 3.1). Relativamente a outros parâmetros, não existe neste exemplo qualquer informação disponível (daí o valor 0 na base de dados).

Também se pode atribuir às linhas um determinado nome. Esta operação é opcional, contudo pode ser útil para referência, em modelos complexos. Gravam-se as novas alterações ao perfil, criando uma nova secção.

Tabela 3.1 – Base de dados para a secção em estudo, com as respectivas propriedades. A velocidade corresponde à velocidade das ondas P ao atravessar a camada, em ms^{-1} ; o valor k é o coeficiente de variação da velocidade com a profundidade; o coeficiente c corresponde à variação da porosidade com a profundidade, em Km^{-1} ; a porosidade e a idade correspondem à porosidade e à idade (em Ma) de cada camada, respectivamente.

Horizonte	Cor	Velocidade	Valor k	Coeficiente c	Porosidade	Idade
Superfície		879	0	0	0	0
Horizonte 1		1173	0	0	0	57
Horizonte 2		1342	0	0	0	66
Horizonte 3		1495	0	0	0	95
Horizonte 4		1744	0	0	0	110
Horizonte 5		1744	0	0	0	120
Horizonte 6		1744	0	0	0	135
Base		0	0	0	0	0

Para se poder realizar operações como a conversão em profundidade e a *descompactação*, a secção deverá estar delimitada lateralmente e todas as linhas do modelo deverão estar estendidas até esses mesmos limites. Este procedimento cria áreas na secção, às quais serão aplicadas as propriedades da base de dados. De modo a aplicar estas fronteiras é necessário construir uma linha horizontal que defina o limite

inferior da imagem correspondente ao horizonte base, e ainda, inserir “postes” verticais, de modo a criar duas linhas de fronteira verticais, em ambas as extremidades da imagem.

Seguidamente, estendem-se e finalizam-se todas as linhas que constituem a secção, seleccionando todas as linhas e aplicando esta função utilizando o valor pré-definido de 5%. Ambas as extremidades das linhas irão ser estendidas até à linha de intersecção mais próxima. Deverá verificar-se se as linhas foram estendidas correctamente e, caso contrário, aumenta-se o valor da percentagem utilizada. Neste caso, verifica-se que este método de projecção, não é suficiente para o tecto do topo do horizonte 6, pelo que é necessário editar a linha que o define, de modo a aproximá-la do seu extremo lateral e estendê-la novamente até ao poste. Informações adicionais sobre como estender linhas encontram-se descritas no Anexo 1.

Por último, seleccionam-se todas as linhas e redimensionam-se os seus nós uniformemente em intervalos de 200 metros. Esta operação aumentará a resolução na interpretação do modelo e, embora não seja essencial, poderá ajudar a evitar anomalias nos nós, quando se estiver a manipular o modelo. Estes novos dados deverão ser gravados numa nova secção.

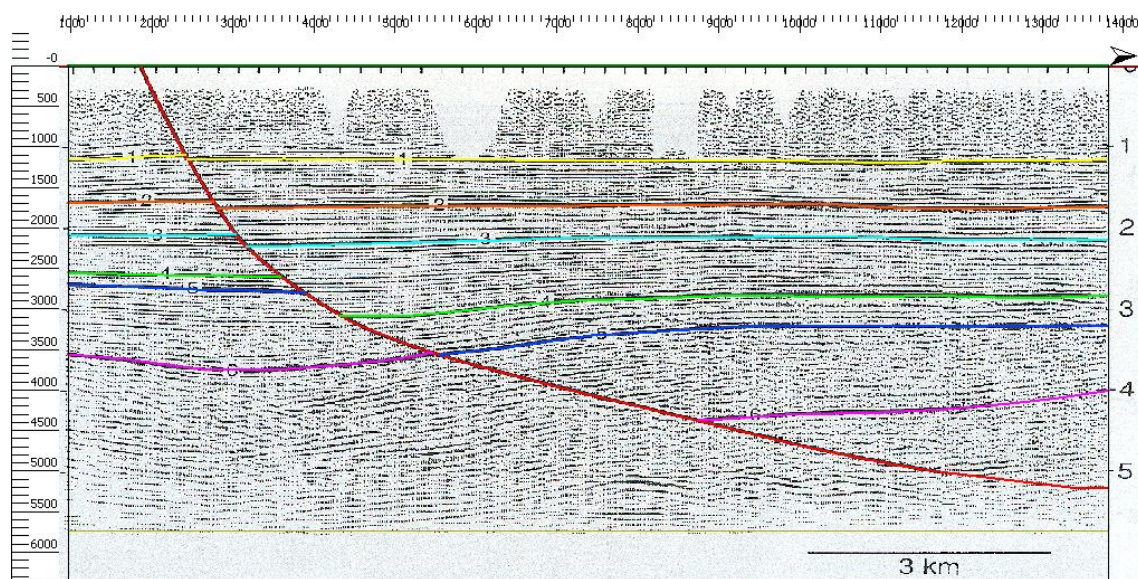


Figura 3.24 – Interpretação das linhas desenhadas sobre a secção, que se encontram estendidas/finalizadas correctamente e com o devido redimensionamento dos nós.

Criação de polígonos a partir de linhas

Os polígonos são criados de modo a dividir a secção sísmica em unidades estratigráficas. Estas unidades adoptarão as propriedades existentes na base de dados.

Em primeiro lugar, criam-se polígonos automaticamente, para cada unidade da secção. Esta operação automática, nem sempre é completamente eficaz. Por vezes aparecem alguns polígonos mal definidos que têm que ser apagados e redefinidos, tal como se pode observar na Figura 3.25.

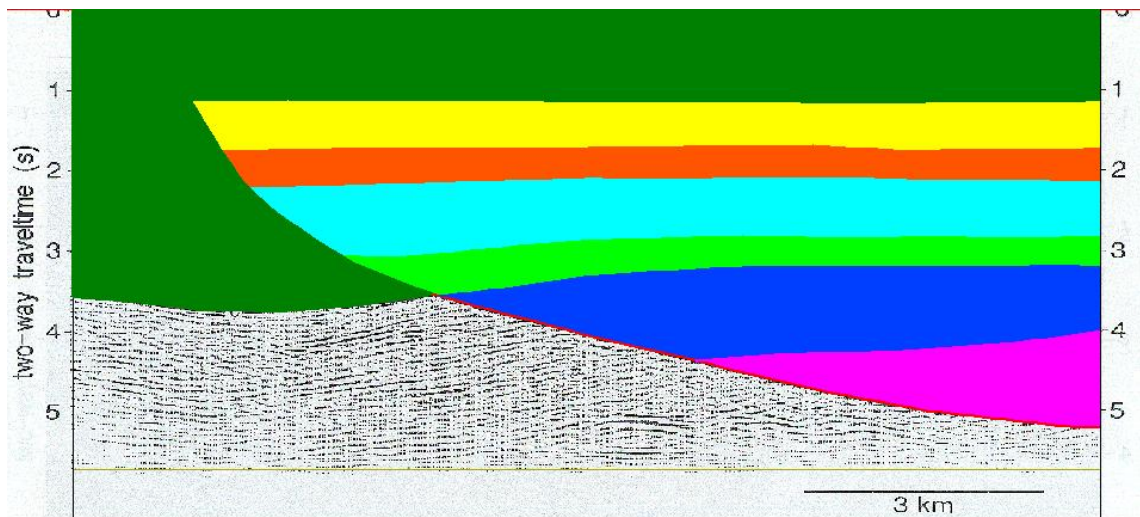


Figura 3.25 – Polígonos criados automaticamente. No muro da falha, as unidades não ficaram bem definidas.

Como alguns polígonos não ficaram bem definidos com a primeira tentativa automática, verifica-se se as propriedades dos objectos foram bem atribuídas e se as extremidades das linhas se encontram bem finalizadas. Após estas verificações, recriam-se os polígonos automaticamente (Figura 3.26).

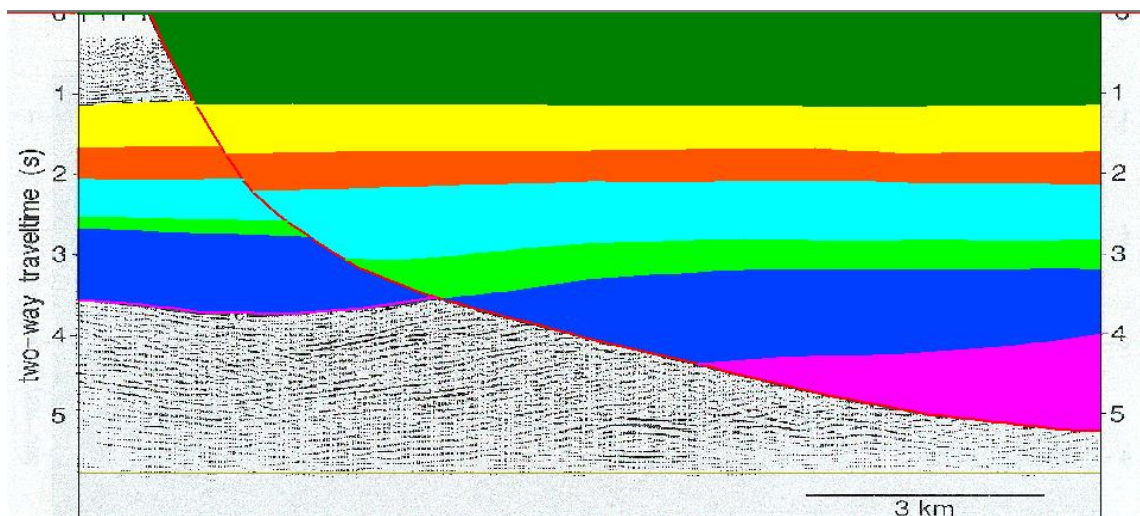


Figura 3.26 – Polígonos criados automaticamente após algumas revisões nas linhas. Como se pode observar, ainda existem dois polígonos que não se encontram construídos.

Como se pode observar, ainda existem alguns problemas, nomeadamente na definição de dois polígonos no muro da falha, correspondentes à unidade superficial (a verde) e à unidade 6 (a rosa). Deste modo, estes polígonos têm que ser criados manualmente, tal como se descreve no Anexo 1. O polígono terá que possuir a mesma cor que o respectivo horizonte superior.

Após a conclusão dos polígonos, pode-se alterar o seu preenchimento ou a sua transparência na caixa de ferramentas das restaurações sísmicas, de modo a poder visualizar-se melhor os polígonos sobrepostos na imagem sísmica (Figura 3.27).

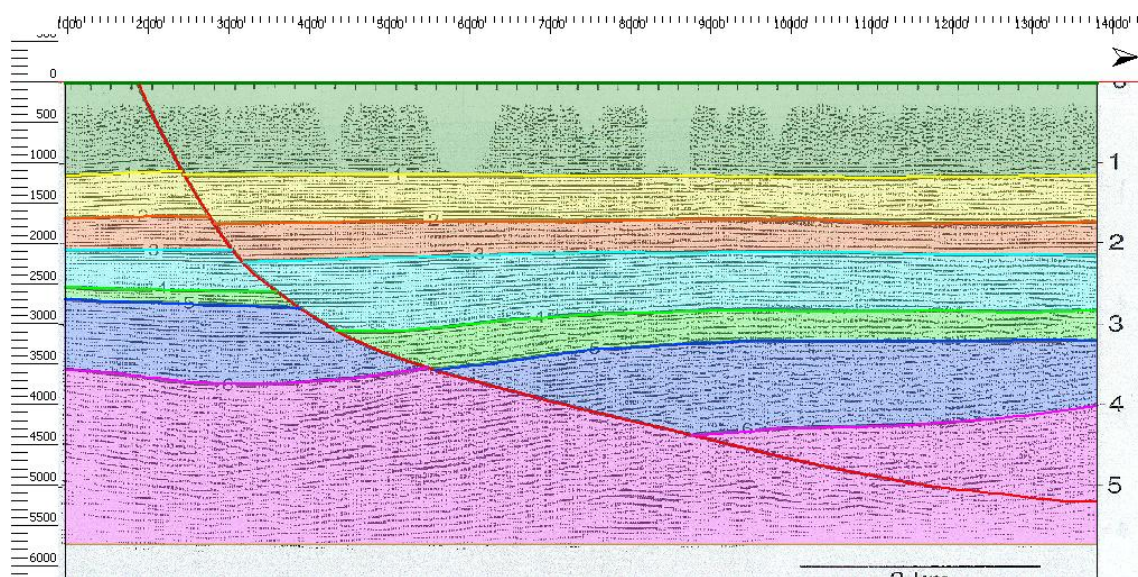


Figura 3.27– Secção com os polígonos criados.

A secção encontra-se agora pronta para ser manipulada. Para a realização da conversão em profundidade e para a *descompactação* da secção, será usada a base de dados que contém as propriedades das diferentes camadas estratigráficas (Tabela 3.1).

3.2.3. Conversão em profundidade

Para se poder posteriormente realizar a *restauração* sísmica, é necessário converter a secção de tempo (twf - tempo de ida e volta das ondas sísmicas reflectidas) para profundidade. Para esta operação são necessários os valores da velocidade de propagação das ondas sísmicas, para cada camada sedimentar (Tabela 3.1). A conversão em profundidade corrige alguns efeitos na sísmica que surgem na secção em tempo devido às variações de velocidade nas diferentes camadas. A inclinação exagerada da falha é um exemplo desse tipo de efeitos nas secções sísmicas.

Usa-se assim o algoritmo de conversão em profundidade, que irá operar com a base de dados (Tabela 3.1). Utilizam-se nesta operação a velocidade correspondente a cada horizonte existente na base de dados e os polígonos, de modo a que o algoritmo processe tanto os objectos correspondentes à interpretação, como também a própria imagem sísmica. Ao aplicar o algoritmo, toda a secção será convertida para valores de profundidade (metros). O aspecto apresentado pelas camadas será alterado consoante as velocidades presentes na base de dados e a linha definida como falha será alterada conjuntamente com o resto das camadas (Figura 3.28).

Por vezes podem ocorrer algumas distorções na imagem sísmica que, em muitas ocasiões, se devem à existência de problemas na definição dos polígonos, sendo necessária a sua reparação. Para o efeito, repete-se se necessário a operação de conversão em profundidade, apagam-se os polígonos nos quais se verificou distorção e seleccionam-se, editam-se, ou até mesmo redesenham-se as linhas das superfícies

correspondentes à deformação observada. Por último, criam-se novos polígonos. Pode também ser muito útil seleccionar o polígono de modo a verificar que este se encontra completo e que não existem irregularidades tais como linhas extra, pois estas irregularidades afectarão a *restauração* sísmica.

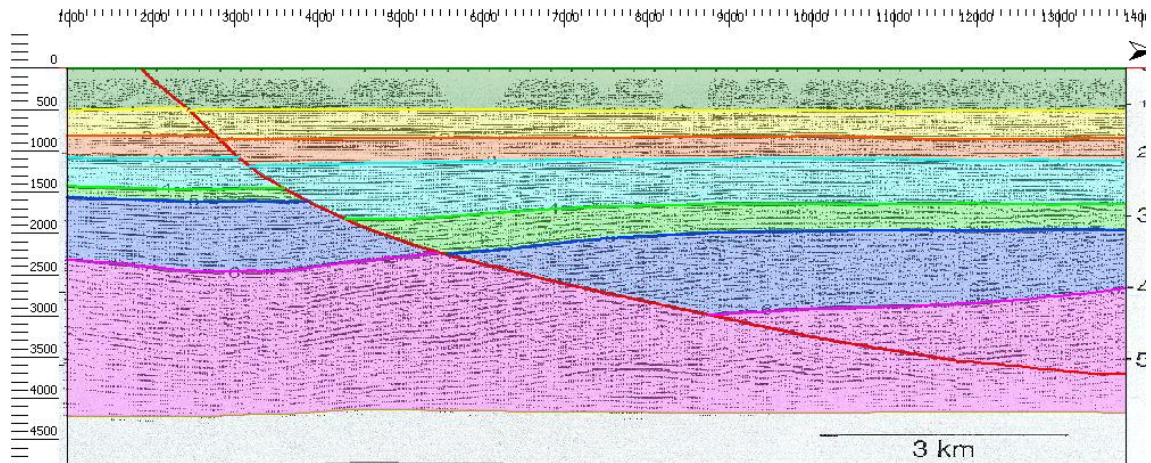


Figura 3.28 – Secção convertida para profundidade. A escala vertical da secção encontra-se agora em profundidade (metros).

A base irregular da secção deve-se à variação lateral na velocidade das camadas, entre o tecto e o muro da falha. As anomalias laterais na velocidade ao longo da falha causam um efeito na secção pois, a uma mesma profundidade, a velocidade do muro é relativamente superior à do tecto.

3.2.4. Backstripping da secção

O *backstripping* da secção, neste exemplo, envolve um procedimento alternado entre a *descompactação* e a *restauração* das camadas presentes na secção. Seguidamente irá descrever-se pormenorizadamente estas etapas.

Descompactação

Para descompactar a secção (devido à presença de uma unidade), a camada superficial deverá primeiro estar restaurada com a forma que teria no tempo em que foi depositada. Tendo em conta que esta unidade se encontra horizontal e não apresenta indícios de deformação, a *restauração* prévia não é necessária.

Abre-se a caixa de ferramentas da *descompactação* e adicionam-se a linha e os dois polígonos que formam a camada da superfície (a verde), adicionando estes objectos como “topo”. Seguidamente selecciona-se a linha da base da secção, adicionando-a como “base”.

Seleccionam-se todos os objectos, incluindo linhas, polígonos e a própria imagem sísmica, definindo este conjunto seleccionado como “camadas intermédias”. Os objectos

correspondentes ao topo e à base da secção não serão incluídos neste campo, pois já se encontram definidos.

Com a opção da utilização dos polígonos seleccionada e utilizando valores pré-definidos no programa, aplica-se o algoritmo da descompactação. A unidade da superfície (a verde) deverá agora ter sido removida da secção e descompactadas as camadas subjacentes (Figura 3.29). Com a remoção da camada da superfície, a nova camada do topo é agora a unidade 1 (a amarelo).

O algoritmo utiliza a porosidade e o coeficiente de variação da porosidade com a profundidade (c) de cada camada, para a realização da *descompactação* (Tabela 3.1). Neste caso, utilizaram-se valores pré-definidos para a sua realização, ou seja, considerou-se que as unidades de toda a secção possuíam valores de porosidade de 0,56 e um coeficiente c de $0,39 \text{ Km}^{-1}$. Caso estes dois parâmetros fossem conhecidos para cada unidade estratigráfica existente, poderiam ser adicionados à base de dados e utilizados na *descompactação*, o que permitiria uma maior precisão nos resultados obtidos.

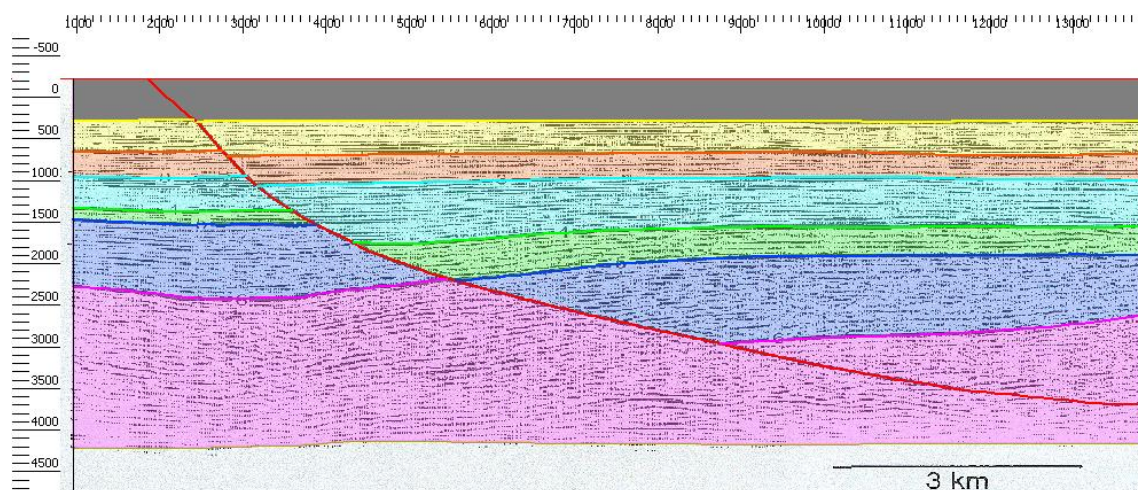


Figura 3.29 – Secção descompactada. A camada superficial é removida e os efeitos provocados por esta *descompactação* podem ser visualizados nas camadas subjacentes.

Por último, deixa-se a caixa de ferramentas da *descompactação* aberta e não se alteram os campos da base e das camadas intermédias. Proceder deste modo, permitirá efectuar uma segunda *descompactação* mais rapidamente, visto que será apenas necessário adicionar a unidade do topo correspondente, pois os restantes campos já se encontram preenchidos.

Restauração das camadas: eliminação do rejeito da falha

Com esta operação pretende-se reconstruir a posição das camadas anteriormente à movimentação da falha. Como a superfície da falha é lítrica, é utilizado o algoritmo de cisalhamento inclinado (*Inclined Shear*) para a *restauração*. Este algoritmo aplica-se normalmente a restaurações em regimes tectónicos extensionais, onde se desenvolvem

estruturas de anticlinal de *rollover* ao longo de falhas normais com geometria lítrica, logo é o algoritmo mais indicado para a *restauração* das camadas neste exemplo.

Começa-se por aplicar esta operação à unidade 1 (a amarelo), que nesta fase da *restauração* corresponde à unidade presente no topo da secção. Abre-se a caixa de ferramentas do algoritmo *Inclined Shear* e adiciona-se a falha lítrica ao campo de falha. Seguidamente, insere-se um ângulo de cisalhamento (*shear angle*) de, por exemplo $+66^\circ$.

De modo a visualizar-se melhor o rejeito da falha na unidade 1 (a amarelo), amplia-se a imagem. Neste exemplo, irá utilizar-se a opção na qual se define um ponto inicial e um ponto final no movimento ao longo da falha, para a *restauração* da camada. Esta opção permite definir manualmente a distância que as camadas do tecto necessitam de ser movidas ao longo da falha. Sendo assim, “pica-se” na extremidade da unidade 1 correspondente ao tecto e seguidamente na extremidade equivalente, correspondente ao muro da falha, tal como mostra a Figura 3.30. Uma seta definirá o movimento que irá ocorrer ao longo da falha.

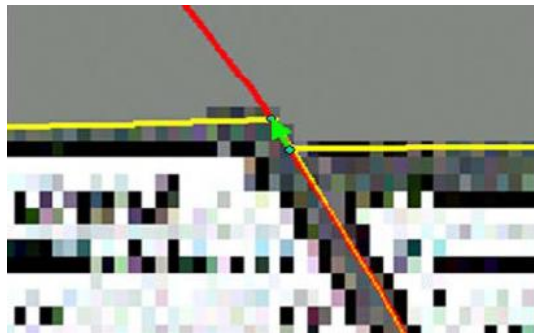


Figura 3.30 – Opção utilizando um ponto inicial e um ponto final que definam a quantidade de movimento necessária à *restauração* da camada.

Após a selecção desta opção, visualiza-se a imagem na sua totalidade e, utilizando uma ferramenta de selecção de grupo, seleccionam-se todos os elementos correspondentes ao tecto da falha e a respectiva imagem sísmica. Estes serão os objectos que serão restaurados ao longo da falha e, por isso, deverão ser adicionados ao campo dos “objectos a serem movidos”.

Por último, aplica-se o algoritmo *Inclined Shear*, verificando se a imagem sísmica é movida com as restantes linhas durante a *restauração*, que não deverá apresentar um aspecto acidentado. Caso se visualize algum tipo de relevo no tecto, significa que o ângulo de cisalhamento escolhido (neste caso, 66°) não foi o correcto, sendo necessário alterá-lo. Repete-se, nesse caso, a *restauração* realizada experimentando diferentes ângulos e aplicando de seguida o algoritmo até se encontrar o melhor resultado. Na Figura 3.31, pode-se visualizar a unidade 1 completamente restaurada, após a eliminação do rejeito da falha.

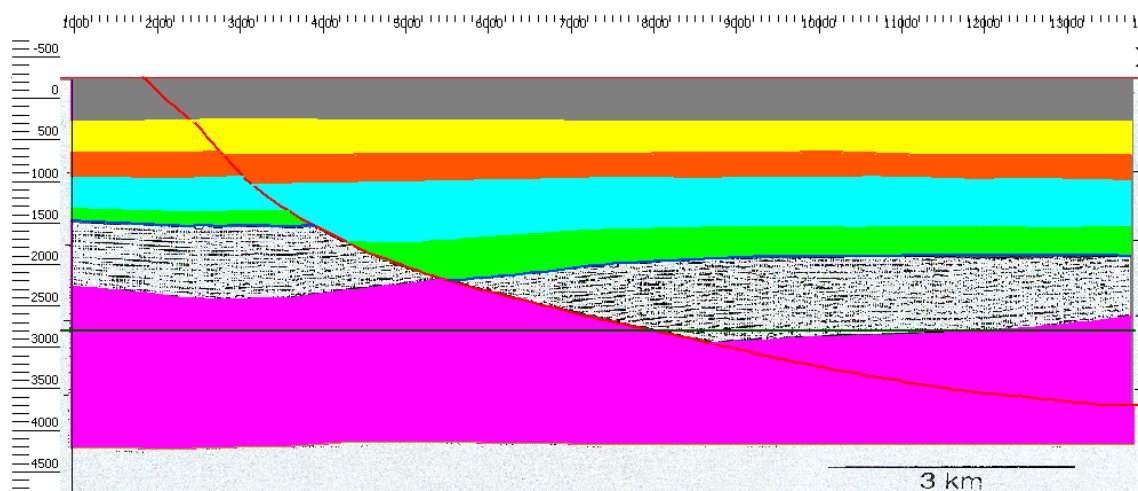


Figura 3.31 – Restauração da unidade 1 (a amarelo).

A caixa de ferramentas referente ao *Inclined Shear* deverá ser mantida aberta e não se deverão alterar os campos nem da falha nem dos objectos a serem movidos, tal como se procedeu anteriormente com a caixa de ferramentas da *descompactação*.

Restauração até à camada azul clara (camada pretendida)

Com a caixa de ferramentas da *descompactação* ainda aberta, adiciona-se ao campo das camadas “topo” as linhas e os polígonos correspondentes à unidade 1 (a amarelo).

A caixa de ferramentas já possui toda a informação relativa à “base” da secção e aos “objectos intermédios”, portanto, não é necessário fazer a sua actualização. De seguida, aplica-se o algoritmo da *descompactação* (Figura 3.32) do mesmo modo que foi descrito anteriormente para a camada da superfície (a verde).

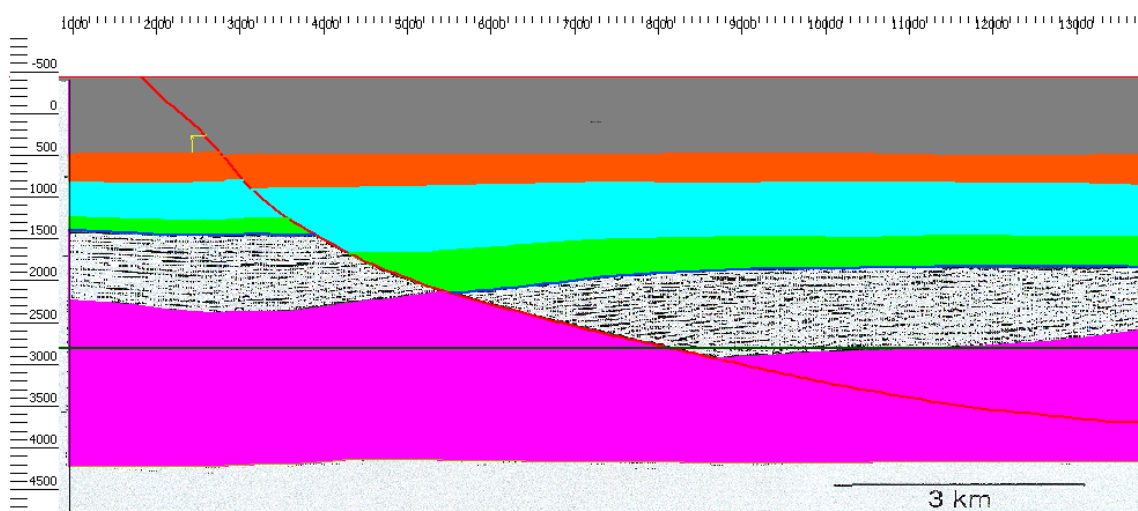


Figura 3.32 – Secção com a unidade 1 descompactada. A camada é removida e os efeitos provocados por esta descompactação podem ser visualizados nas camadas subjacentes.

Para as restantes camadas repetem-se os procedimentos de *restauração* (onde se elimina o rejeito da falha na camada em questão), e de *descompactação*, tal como foi descrito anteriormente, até que a unidade 3 (a azul claro) tenha sido restaurada (Figuras 3.33, 3.34 e 3.35). Lembra-se que as informações disponíveis, para este caso de estudo, indicam que a expulsão dos fluidos ocorreu durante a sedimentação desta camada.

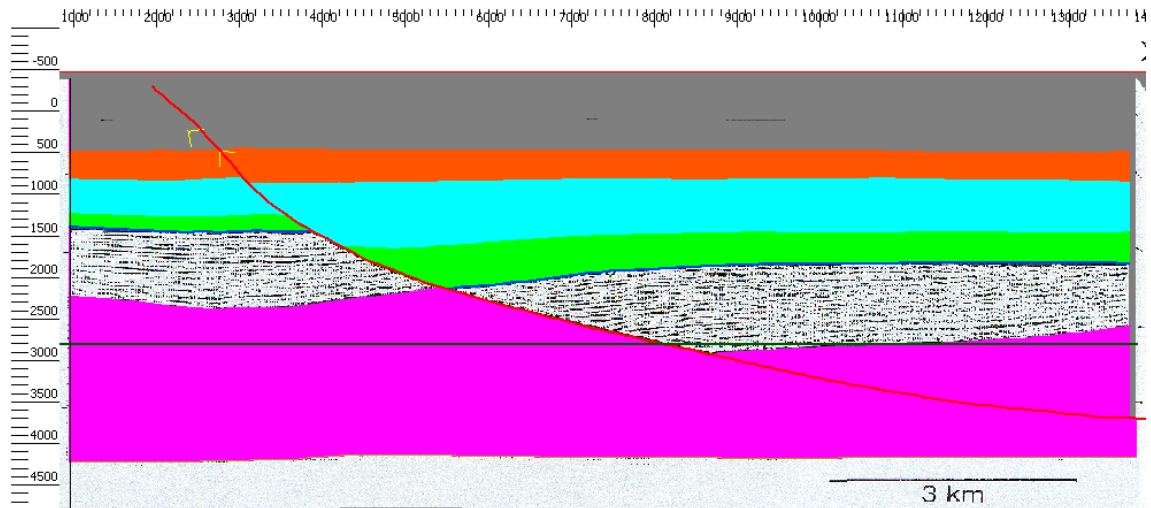


Figura 3.33 – Secção após a restauração da unidade 2 (a laranja).

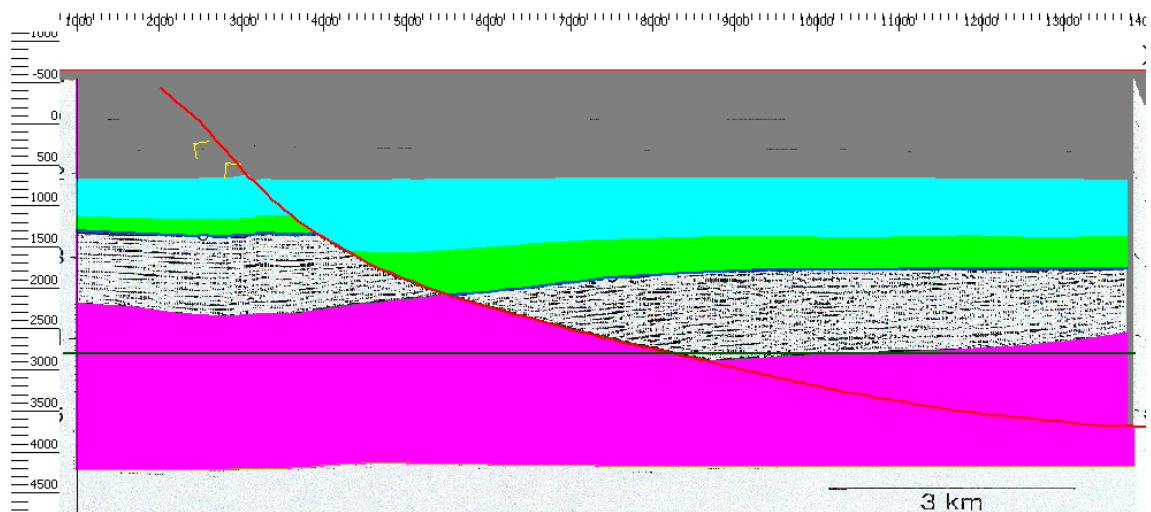


Figura 3.34 – Secção descompactada. A unidade 2 (a laranja) é removida e os efeitos provocados por esta descompactação podem ser visualizados nas camadas subjacentes.

Concluída a *restauração* pretendida, pode-se fazer a avaliação do risco de exploração da armadilha existente no muro da falha (armadilha 2, Figura 3.21).

Desenha-se uma linha horizontal à profundidade de 2800 m. Esta linha, de acordo com a informação do tutorial, corresponde à profundidade de expulsão de fluidos e irá ser usada posteriormente, de modo a auxiliar não só na avaliação do momento de maturação, ou seja, no momento em que a rocha fonte atinge as condições apropriadas de pressão e de temperatura para gerar hidrocarbonetos, bem como na avaliação da possibilidade de

existirem hidrocarbonetos no reservatório presente no muro da falha (armadilha 2, Figura 3.21).

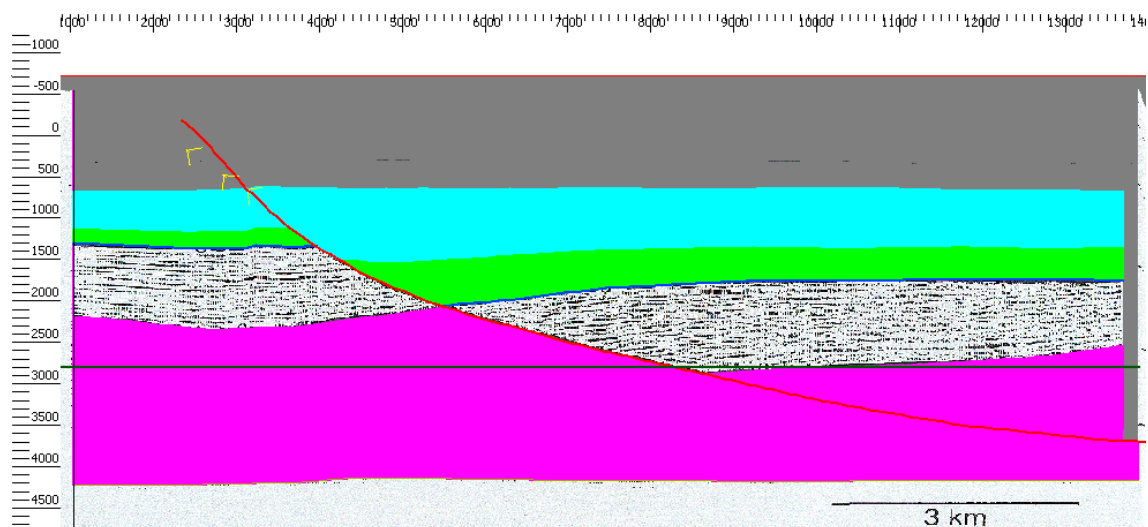


Figura 3.35 – Seção após a restauração da unidade 3 (a azul claro).

3.2.5. Comentários finais

Dos resultados obtidos, observa-se que existe uma justaposição limitada entre as duas armadilhas formadas pelo reservatório (unidade sem polígono a defini-la, Figura 3.35). Esta justaposição é de cerca de 60 metros, ou seja, aproximadamente a resolução dos dados sísmicos e, por isso, considerada insignificante. Por outro lado existe uma zona limitada de maturação no tecto da falha (representada na Figura 3.36 como uma linha laranja), que corresponde aproximadamente a 1 km de largura. Devido a estes dois factores combinados, pode-se prever que, dentro dos limites deste estudo e do detalhe da interpretação, não deve ter ocorrido migração ao longo da falha para a armadilha do muro da falha (armadilha 2, Figura 3.21) pelo que, o risco de exploração nesta armadilha é elevado.

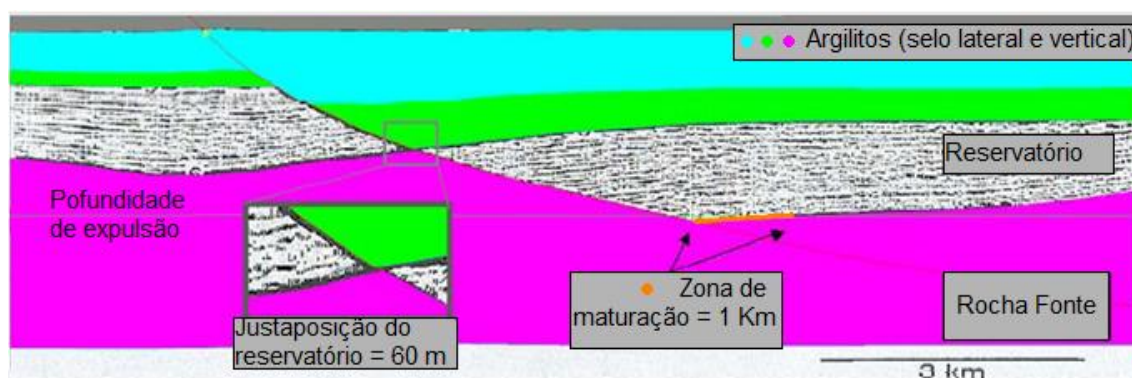


Figura 3.36 – Restauração do horizonte 3, com toda a informação existente.

A título de síntese, na Figura 3.37, apresenta-se um diagrama de fluxo com a sequência das principais fases da resolução deste exercício.

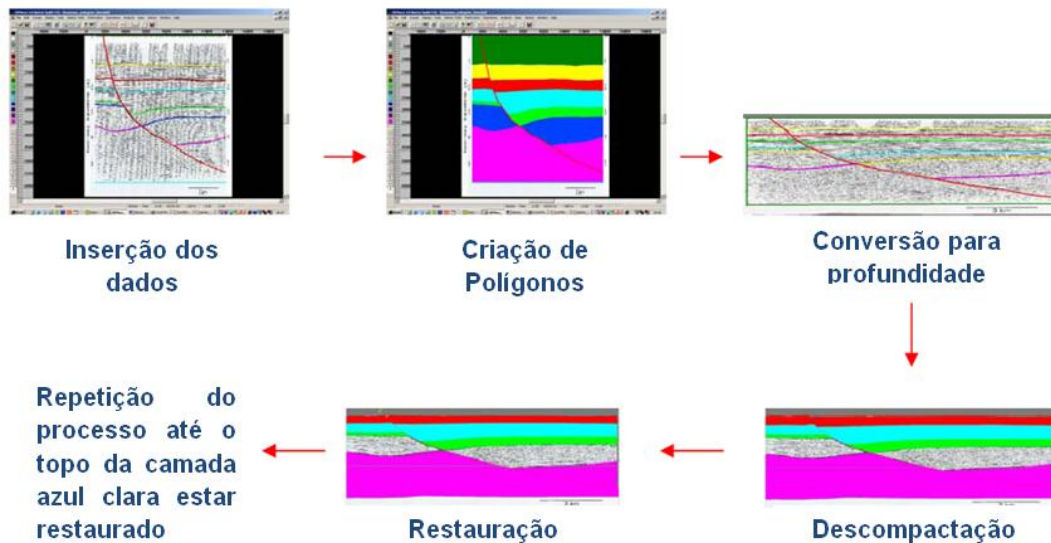


Figura 3.37 – Diagrama de fluxo com as operações principais realizadas neste exemplo.

3.3. Restauração de uma secção com sal

O objectivo deste exemplo é efectuar o *backstripping* de secções que incluam sal e estruturas compressivas associadas. Tal como foi referido na secção 2.3, quando existe uma unidade de sal, esta será considerada como uma unidade incompressível, que deverá ser encarada de uma forma especial durante a descompactação. Além disso, é aconselhável que, na presença de sal, se efectue o devido ajuste isostático ao ser descompactada cada unidade. Devido à presença de estruturas compressivas na secção, terá também que se deslocar para um novo *datum* (que poderá ser uma paleo-batimetria, um paleo-relevo ou até mesmo um *datum* regional) as unidades da secção, pois durante sua compressão ocorre normalmente elevação das unidades.

A secção em estudo (Figura 3.38), situada em Perdido, a norte do Golfo do México, é um exemplo de uma secção que apresenta sal, na qual se observam numerosas estruturas compressivas. Na secção podem-se observar várias falhas inversas e dobramentos. Observa-se ainda uma descontinuidade estratigráfica (assinalada na figura a preto) que evidencia a erosão de algumas camadas. Esta descontinuidade separa as unidades falhadas das unidades que não se encontram afectadas por falhas.

Ao restaurar sequencialmente cada horizonte da secção em estudo (Figura 3.38), podem-se compreender melhor vários aspectos importantes, críticos no sucesso de qualquer exploração, tais como: a relação entre o movimento das falhas, o crescimento de dobras e o seu efeito na migração de hidrocarbonetos; a influência da evolução estrutural na formação de armadilhas e nos caminhos de migração; e como a presença de sal alóctone afecta a distribuição de hidrocarbonetos.

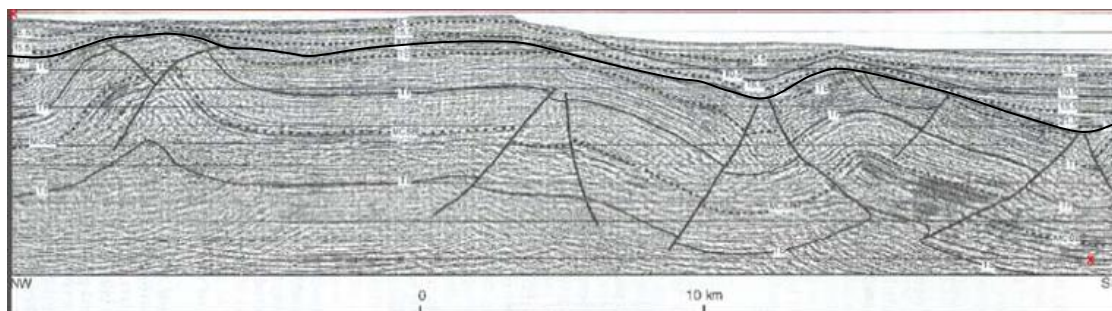


Figura 3.38 – Secção em estudo já com a devida interpretação. Na figura encontra-se destacada a descontinuidade estratigráfica existente, com uma linha a preto.

De modo a dimensionar e a construir a secção, irá utilizar-se essencialmente o mesmo procedimento descrito nos exemplos anteriores (secções 3.1. e 3.2.). Após se construir e converter a secção para profundidade, é iniciada a sua *restauração*.

Até à descontinuidade estratigráfica principal (linha destacada a preto, na Figura 3.38), será efectuada a seguinte metodologia de *restauração* da secção: remoção das camadas superiores e *descompactação* das camadas subjacentes, ajuste isostático (utilizando o modelo isostático de *Airy*) e elevação do horizonte superficial (e consequentemente da restante secção) a um *datum* de referência, utilizando o algoritmo *Flexural Slip Unfold*. A unidade sobre a descontinuidade apresenta alguns sinais de erosão, pelo que, antes da sua elevação a um *datum*, será ainda estimada a sua espessura original.

Todas as unidades (nomeadamente as unidades cortadas pela discordância) que apresentem evidências de erosão, serão construídas, utilizando uma função de construção de camadas, de modo a ficarem com a sua espessura original (anteriormente à erosão).

Após a construção dos horizontes remove-se o rejeito das falhas existentes na secção, utilizando o algoritmo *Fault Parallel Flow*. Por último, eleva-se o horizonte superficial (nesta fase de *restauração*) a um *datum* de referência e *descompacta-se* a secção, realizando o devido ajuste isostático.

3.3.1. Importação de um mapa no 2DMove

Neste exemplo, contrariamente aos anteriores, é fornecido um mapa que pode ser associado à secção em estudo. Importa-se a imagem do mapa, utilizando valores pré-definidos para o seu posicionamento, que asseguram a proporção da imagem original.

Dimensiona-se a imagem do mapa, de acordo com o seu comprimento e largura reais, utilizando a barra de escala da imagem na determinação desses valores. Visto que não existem coordenadas associadas ao mapa, inserem-se como coordenadas (nos dados do ficheiro) esses valores. Assim, para o canto inferior esquerdo da imagem, inserem-se as coordenadas (0,0) e para o canto superior direito as coordenadas (100000,63000). Caso fossem conhecidas as coordenadas UTM da imagem, estas poderiam ser inseridas nestes campos.

O mapa encontra-se agora dimensionado (Figura 3.39). A próxima etapa será introduzir uma secção ao mapa.

3.3.2. Associação de uma secção sísmica a um mapa

O programa 2DMove permite associar secções sísmicas aos respectivos mapas. Se as secções se encontram na forma de ficheiros geo-referenciados, podem ser inseridas directamente no mapa. Caso o ficheiro não inclua dados de posição, é necessário efectuar a ligação da imagem da secção sísmica à imagem do mapa. Desde que o mapa se apresente devidamente dimensionado, é possível introduzir imagens de secções, mesmo que estas não se encontrem geo-referenciadas.

Utilizando a ferramenta de introdução de secções no programa, desenha-se um traço de secção ao longo da posição geográfica pretendida. Este caso de estudo irá focalizar-se na secção “C” (Figura 3.39). Assim, desenha-se no mapa o traço de secção ao longo da linha marcada como “C” (Figura 3.39). Este será o traço ao longo do qual a imagem da secção será inserida. É possível renomear a secção criada, na lista das secções.

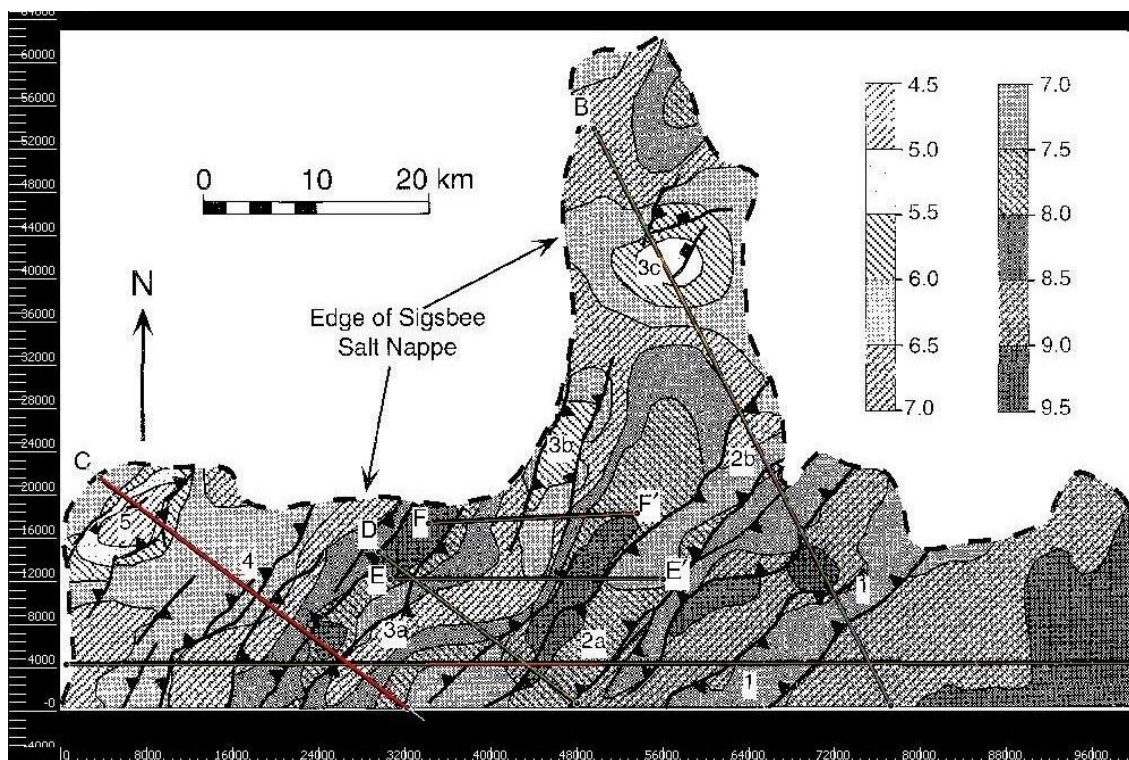


Figura 3.39 – Mapa base dimensionado e com o traço de secção inserido ao longo da linha “C” (a vermelho).

É agora possível visualizar a secção criada. Esta operação abre uma nova janela onde se observa apenas o traço de secção (a vermelho), que corresponde ao traço desenhado no mapa ao longo da linha “C”. A secção encontra-se assim ligada ao mapa base (Figura 3.40).

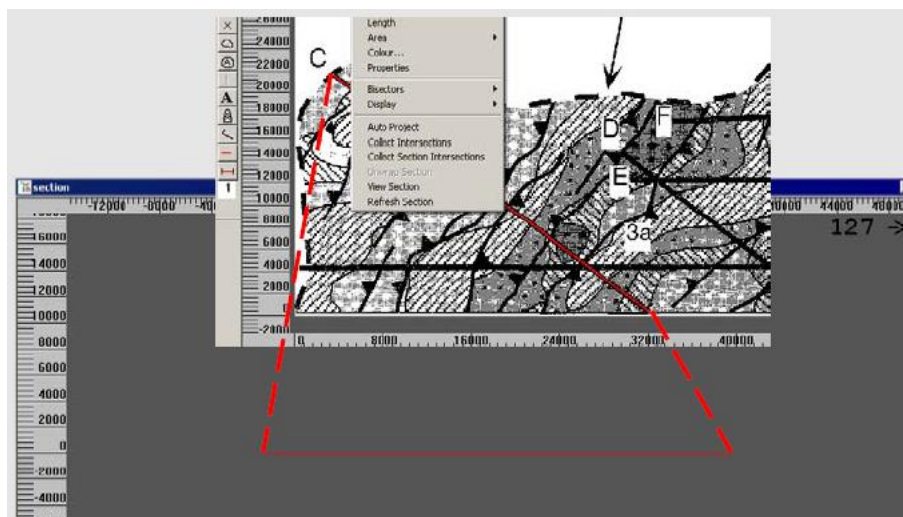


Figura 3.40 – Mapa base e traço de secção na nova janela. O traço de secção da nova janela corresponde ao traço desenhado no mapa ao longo da linha “C”.

Para posicionar correctamente uma secção sísmica, as unidades do programa têm obrigatoriamente que estar nas unidades apresentadas pela secção.

A escala vertical nas secções sísmicas encontra-se, em geral, em unidades de tempo (segundos ou milissegundos), pois são utilizados métodos de sísmica de reflexão, que registam o tempo de ida e volta das ondas sísmicas.

Como a escala vertical nesta nova janela não se encontra em tempo, então terá que ser alterada (nos dados do ficheiro). Nesta etapa é também importante anotar as coordenadas existentes na caixa de ferramentas em questão, pois serão úteis posteriormente. Aplica-se a alteração. A secção em causa aparece agora assinalada em tempo na lista das secções do programa. Gravam-se estas novas alterações na secção já existente e volta-se ao mapa de modo a guardar todo o documento.

De seguida, insere-se a imagem correspondente à secção sísmica “C” ao longo do traço de secção criado. Inserem-se como coordenadas globais (relativas) as coordenadas anotadas anteriormente (nos dados do ficheiro). Assim, a imagem da secção sísmica aparece já devidamente posicionada horizontalmente, isto é, na totalidade do seu comprimento (Figura 3.41).

A imagem da secção da Figura 3.41 contém linhas horizontais com um intervalo de 500 milissegundos, entre elas. Para posicionar a imagem na vertical, desenha-se um ponto no extremo superior esquerdo da imagem da secção, coincidente com a primeira linha e um ponto na última linha da imagem, situado no seu extremo inferior direito, tal como se pode observar na Figura 3.41. Da imagem original, sabe-se que estas duas linhas correspondem a 3000 e 9500 milissegundos, respectivamente. Serão assim utilizados estes valores no dimensionamento vertical da imagem (Figura 3.42).

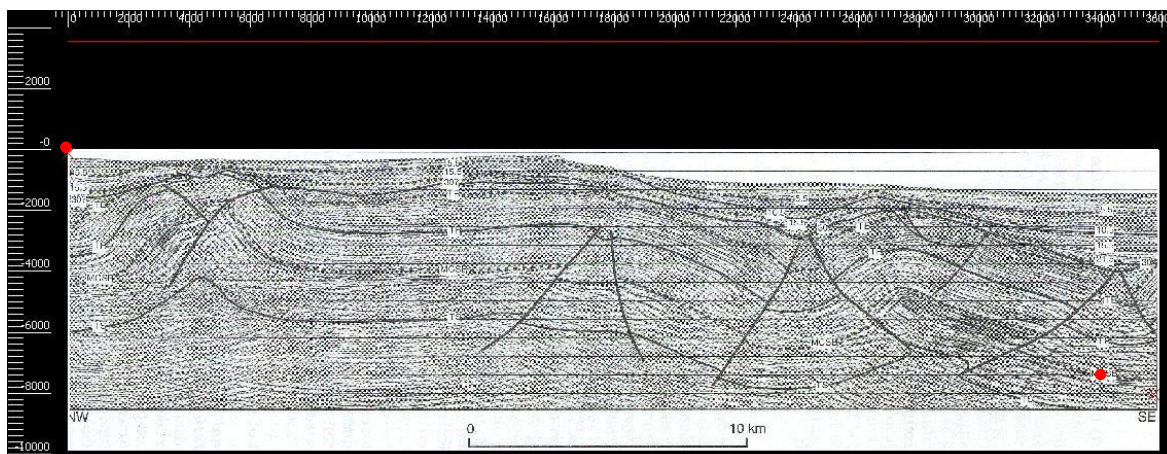


Figura 3.41 – Imagem da secção sísmica com os dois pontos que serão utilizados no seu dimensionamento vertical.

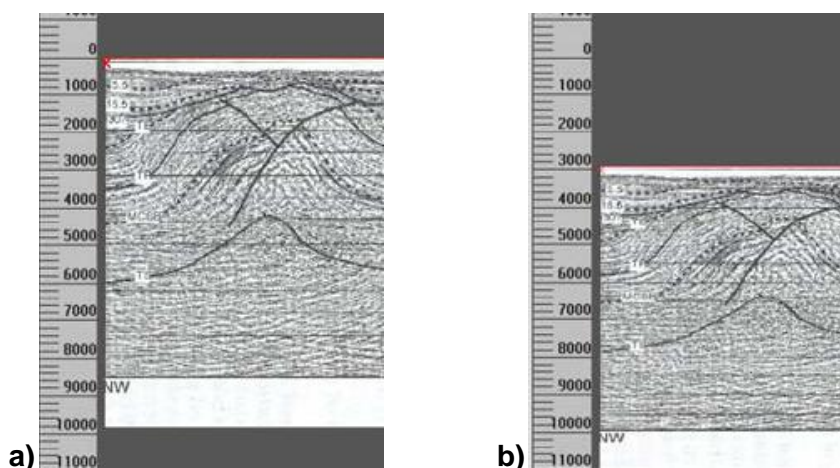


Figura 3.42 – Dimensionamento vertical da imagem da secção sísmica; a) imagem inserida ao programa sem dimensionamento; b) imagem devidamente dimensionada, de acordo com a escala lateral do programa (em milissegundos).

3.3.3. Construção da secção sísmica

Depois de se dimensionar a imagem da secção, procede-se à sua interpretação e construção. Neste caso, a própria imagem já possui uma interpretação desenhada sobre os dados sísmicos, logo, inicia-se o processo pela construção da secção.

A primeira etapa na construção da secção é a delimitação da imagem lateralmente, inserindo “postes” verticais.

Seguidamente, utilizando cores distintas para cada unidade, desenham-se as linhas já interpretadas e que correspondem às falhas e às unidades deposicionais.

Estendem-se e terminam-se as linhas desenhadas sobre a secção, de modo a terminá-las correctamente, permitindo posteriormente a criação dos polígonos.

Após o passo anterior, redimensionam-se os nós das linhas de modo a que definam um intervalo fixo de 200 m, ao longo de todo o seu comprimento. Esta operação para além de corrigir nós duplicados que podem ter sido criados acidentalmente durante o desenho das linhas, poderá ainda, ser muito útil em alguns passos posteriores (tais como a *restauração* e a *descompactação*). Deve-se utilizar o valor mínimo apropriado, de modo a que a forma das estruturas não fique alterada. Esta operação deverá ser repetida antes de cada fase de *restauração* e após se editar qualquer polígono ou linha, de forma a reduzir erros e artefactos que possam ser possivelmente introduzidos ao modelo.

Na Figura 3.43, pode visualizar-se a secção construída, com os postes inseridos e as linhas de interpretação desenhadas, estendidas e com os nós devidamente redimensionados.

Como se pretende manipular a imagem, é necessária a criação de polígonos para cada unidade existente. Para mais detalhes sobre este passo, pode-se consultar o Anexo 1. Na Figura 3.44 apresenta-se a secção com os polígonos já criados.

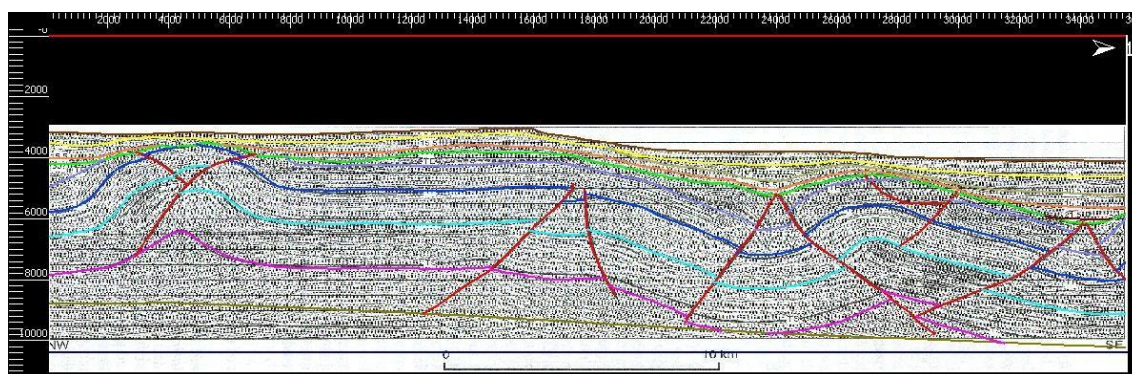


Figura 3.43 - Secção C correctamente construída.

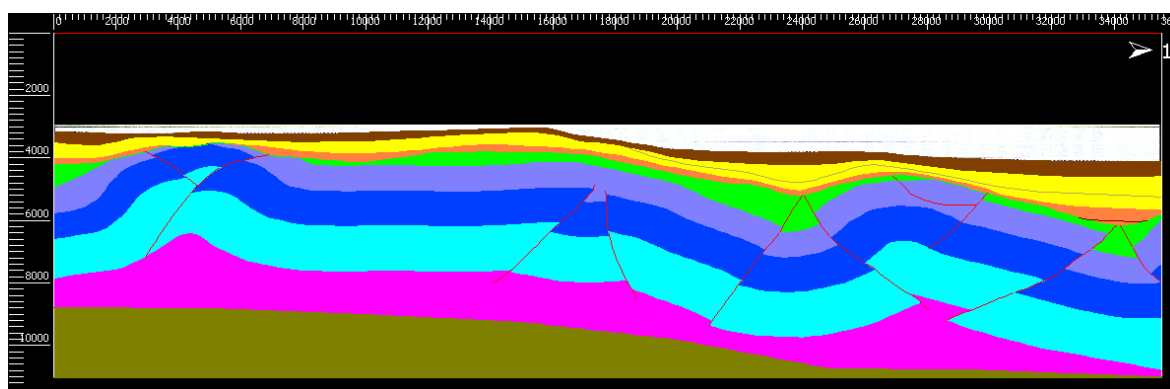


Figura 3.44 - Secção C após terem sido criados os polígonos.

De modo a facilitar os passos da *restauração* e a torná-los mais rapidamente manipuláveis, a partir desta etapa não será utilizada a imagem sísmica.

Devido à separação entre o soco acústico e a parte superior da secção pela camada de sal basal, é impossível distinguir a quantidade de subsidência devida ao movimento diapírico (a rosa) da quantidade de subsidência do soco pré sal (a verde oliva), que

ocorreu realmente (Figura 3.44). Por este motivo não será incluída a camada pré sal (verde oliva) durante a *restauração*, de modo a modelar o sal como um nível de descolamento.

3.3.4. Base de dados

Será necessária a construção de uma base de dados para o mapa. Esta pode ser importada para o programa ou criada a partir da secção (ou do mapa), de modo a apresentar os valores dos parâmetros pretendidos para as unidades da secção. Estes parâmetros podem ser directamente inseridos ou alterados na base de dados. Neste exemplo, foi utilizada a base de dados do tutorial e que pode ser observada na Tabela 3.2, onde se especificam os parâmetros referidos no capítulo 2 (secções 2.2 e 2.3) e que serão utilizados durante a *restauração*, nos diferentes cálculos.

Tabela 3.2 – Base de dados para a secção em estudo com as suas respectivas propriedades. A velocidade encontra-se em metros por segundo (ms^{-1}); o valor k e o coeficiente c correspondem, respectivamente, à variação da velocidade (s^{-1}) e da porosidade com a profundidade (Km^{-1}); a porosidade é um parâmetro adimensional e, por último, a idade está apresentada em milhões de anos (Ma).

Horizonte	Cor	Velocidade	k	Coeficiente c	Porosidade	Idade
Topo		0.00	0	0.01	0.01	0
SeaBed		1828	0	0.45	0.51	0.01
5.5		1916	0	0.41	0.49	5.5
10.5		2055	0	0.41	0.49	10.5
15.5		2194	0	0.43	0.50	15.5
21.5		2333	0	0.39	0.48	21.5
30		2516	0	0.41	0.49	30
TE		2742	0	0.40	0.49	36
TP		2971	0	0.38	0.47	58.5
MCSB		3044	0	0.28	0.46	94
TS		4572	0	0.01	0.01	161
BS		3044	0	0.28	0.46	165
Base		0.01	0	0.01	0.01	175

Na coluna do horizonte insere-se o nome do horizonte em questão, que é associado à sua respectiva cor. Na coluna da velocidade insere-se o valor da velocidade das ondas P, em cada camada (em ms^{-1}) e na coluna do valor k, o coeficiente de variação da velocidade (das ondas P na camada) com a profundidade, parâmetros estes que serão utilizados na conversão em profundidade. Como, neste exemplo, o valor k é zero, significa que não existe variação na velocidade das ondas P (nas camadas), com o aumento da profundidade.

O coeficiente da variação da porosidade com a profundidade (coeficiente c) e a porosidade são parâmetros necessários no cálculo da descompactação da secção, pela existência das unidades. O coeficiente c é a taxa de diminuição da porosidade com a profundidade (Km^{-1}) e a porosidade (adimensional) corresponde à porosidade que a unidade teria imediatamente após a sua sedimentação, ou seja, no tempo 0. Na coluna da idade, encontra-se a idade de cada unidade (em Ma), parâmetro utilizado no cálculo das curvas da história da compactação e que não será efectuado neste exemplo.

3.3.5. Recomendações e informações adicionais

Antes de ser realizada qualquer *restauração* de grande escala, deverá reunir-se o máximo de informações relativamente à litologia e à história geológica da área em estudo, que podem facilitar a escolha de parâmetros e a sequência dos passos durante a *restauração*. No tutorial do programa são referidos alguns aspectos relativos tanto à geologia regional como à própria secção sísmica em estudo.

No norte do Golfo do México, a principal rocha fonte corresponde ao Cretácico Médio. A migração dos hidrocarbonetos iniciou-se no Cenozóico tardio e, ao longo deste período, a bacia foi preenchida com areias (potencial reservatório).

Na Figura 3.45 é apresentado um esquema das principais unidades existentes na secção, com as cores utilizadas para cada camada e a respectiva idade.

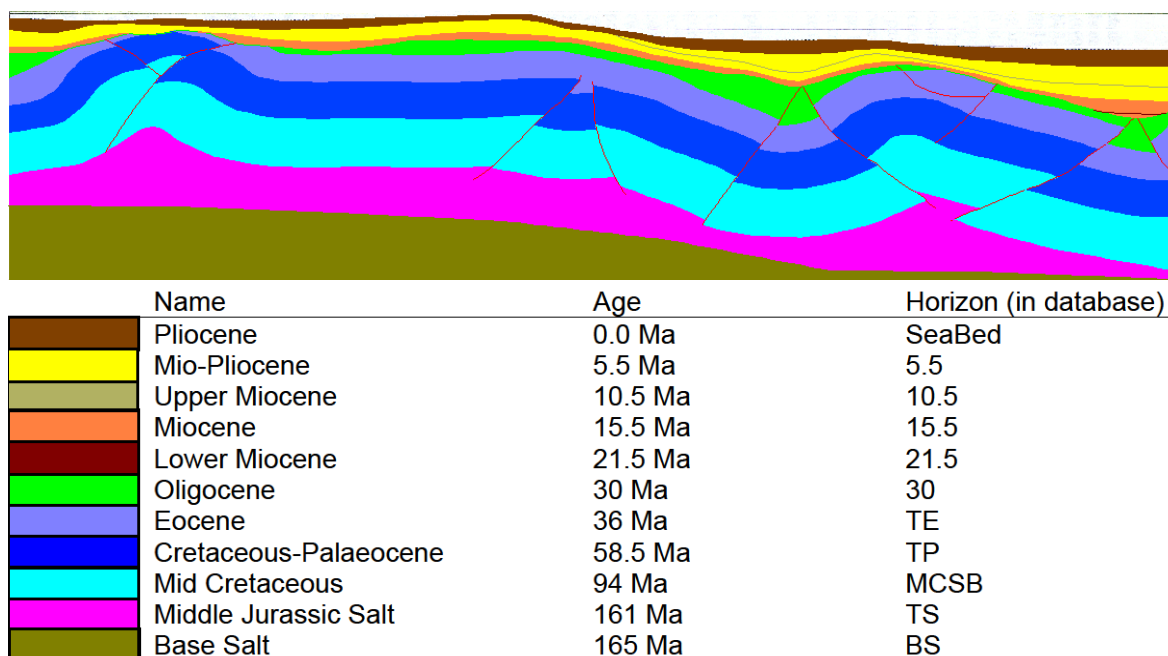


Figura 3.45 – Secção em estudo com as principais unidades estratigráficas identificadas e tabela com as idades dos horizontes que as delimitam.

Algumas unidades, nomeadamente a unidade do Miocénico Superior e a Mio-Pliocénico (Figura 3.45), durante a *restauração* serão abordadas conjuntamente, por essa razão,

aparecem apresentadas na secção da Figura 3.45 com a mesma cor (amarelo). Igualmente, a unidade do Miocénico inferior será considerada conjuntamente com a unidade do Miocénico.

Durante a *restauração*, a menos que se conheça um local onde não exista sal na base da secção, não é possível quantificar a paleo-batimetria absoluta. No entanto, é possível fazer uma estimativa, se existirem indicações paleo-batimétricas na pilha de sedimentos. Caso não se disponha deste tipo de informações, pode ser realizada a *restauração* a um *datum*, utilizando apenas um espaço de acumulação relativo.

Alguns dos principais dados geológicos regionais segundo Trudgill et al. (1999):

A intrusão do sal na faixa de dobramento em Perdido está directamente ligada à deformação e ao movimento do sal por deslizamento gravitacional, em direcção a sul.

O topo dos estratos do Eocénico corresponde a uma superfície de erosão e representa, segundo estes autores, a fronteira aproximada entre os estratos pré-cinemáticos e sin-cinemáticos.

O Cretácico corresponde a uma época de rápida subsidência da bacia. A fronteira do topo da sequência do Cretácico Médio (a azul claro) corresponde a um reflector facilmente identificável nas linhas sísmicas regionais.

O Oligocénico superior, pós-cinemático, segundo estes autores, e os estratos mais jovens são representados, neste exemplo, por unidades que preenchem as bacias de sinclinais e formam gradualmente *onlaps* nas estruturas de anticlinal antes de as dobras serem completamente soterradas.

Algumas considerações a ter em conta relativamente ao sal:

O sal é muito mais deformável que as outras litologias, tanto sob tracção, como sob compressão (Jackson e Vendeville, 1994).

A natureza viscosa do sal faz com que as camadas deste material apresentem uma resistência constante, embora que muito fraca, independentemente da profundidade. Em contraste, nas outras camadas sedimentares com diferentes litologias, a resistência aumenta com a profundidade (Vendeville e Jackson, 1992). Assim, o sal costuma ser um excelente nível de descolamento (Rowan e Vendeville, 2002).

Tendo em conta o factor anterior, qualquer *restauração* realizada em secções sísmicas que incluam sal, este deverá ser modelado de modo a actuar como um descolamento, ou seja, separado da restante secção. Na secção em estudo irá modelar-se a base do sal de modo a que actue como um nível de descolamento.

O sal tem uma densidade constante, independentemente da profundidade, ao contrário dos outros tipos de litologias. Deste modo, o sal é mais denso que os estratos ao seu redor quando se encontra à superfície e menos denso quando se encontra a profundidades entre 100 a 1500 m (Jackson e Talbot, 1986).

Como a densidade do sal é constante com a profundidade, pode-se assumir que a sua porosidade também o é. Isto significa que, durante a *restauração*, o sal não é sujeito a compactação nem a *descompactação*.

3.3.6. Conversão da secção para profundidade

Para se poder realizar a conversão da secção de tempo para profundidade, utiliza-se a base de dados existente (Tabela 3.2) e o método da velocidade v_0 , que corresponde à velocidade de superfície para cada unidade.

O parâmetro necessário para a conversão em profundidade é a velocidade. Os valores existentes na base de dados (Tabela 3.2) correspondem a valores típicos para o Golfo do México e caso se pretenda, podem ser alterados. Como se pode verificar, existe um elevado contraste de velocidades entre a unidade do sal (a rosa) e os restantes sedimentos, tal como seria de esperar.

Na Figura 3.46 pode-se observar a secção convertida para valores de profundidade (metros). Nos dados do ficheiro, verifica-se que a secção se encontra agora em valores de profundidade.

De modo a obter-se uma maior confiança nos resultados obtidos, estes podem ser comparados com dados de poços existentes. Neste exemplo, no tutorial indica-se que o resultado obtido (Figura 3.46) foi verificado relativamente a profundidades regionais, conhecidas para alguns horizontes.

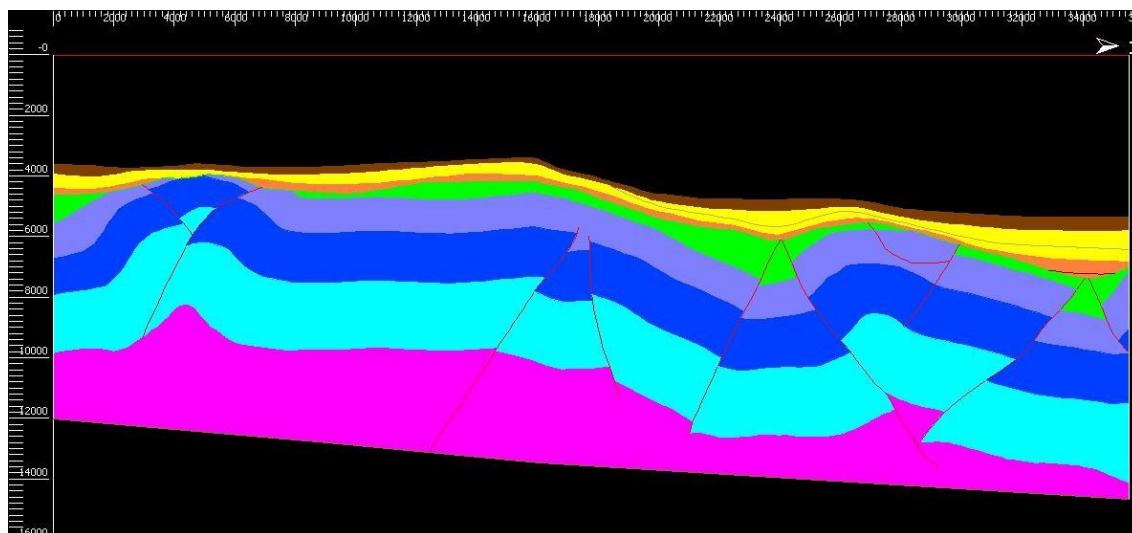


Figura 3.46 – Secção convertida para profundidade (metros).

3.3.7. Restauração da camada do Mio-Pliocénico

Descompactação e ajuste isostático

A primeira etapa na *restauração* corresponde à *descompactação* da secção, provocada pela existência da unidade superficial, ou seja, da camada castanha do Pliocénico, utilizando a base de dados existente (Tabela 3.2). No cálculo da *descompactação* da secção são utilizados valores de porosidade e o coeficiente c para cada unidade.

Seleccionam-se todas as linhas e polígonos que definem a camada castanha, adicionando-os como camadas “topo”. Seguidamente, seleccionam-se todos os objectos da secção, definindo-os como “objectos intermédios”. Como a base da secção corresponde ao topo do sal (Jurássico Médio, a rosa), seleccionam-se todos estes objectos, adicionando-os como camadas “base”. Quando todos os campos correspondentes à *descompactação* estiverem devidamente preenchidos, abre-se a base de dados (Tabela 3.2).

É possível definir o número de pontos para os quais se deseja realizar o cálculo da *descompactação*, ao longo da secção. Neste exemplo, pretende-se utilizar neste cálculo, 100 pontos.

A remoção da camada castanha provoca um levantamento isostático nas camadas subjacentes. De modo a modelar este levantamento, é necessária a realização de um ajuste isostático, antes de se aplicar este algoritmo.

Geralmente aplica-se a modelação isostática quando as secções têm centenas de quilómetros, no entanto, devido à presença de sal, a modelação é necessária neste caso, muito embora a secção em estudo possua apenas 34 km de comprimento.

Podem ser utilizados dois tipos de modelo isostático: *Flexural* ou de *Airy*. Enquanto que o modelo *Flexural* atribui rigidez lateral à litosfera, o modelo de *Airy* atribui uma acomodação vertical.

No modelo proposto por George Biddell Airy, ou modelo de *Airy*, as diferenças topográficas de altitude são compensadas por variações na espessura da crosta terrestre.

No modelo de Vening Meinesz, ou modelo *Flexural*, a litosfera actua como uma plataforma elástica e a sua rigidez inerente distribui carga local sobre uma ampla região, dobrando-a. Esta hipótese foi sugerida para explicar como é que grandes cargas, tais como montes marinhos, são compensadas pelo deslocamento regional lateral da litosfera.

Neste exemplo irá utilizar-se o modelo isostático de *Airy*, que é mais sensível a grandes variações na espessura das camadas. A unidade que se pretende remover (a castanho, na Figura 3.46) possui uma espessura aproximadamente constante ao longo da secção, logo pode-se aplicar directamente a isostasia de *Airy*. Posteriormente, em camadas com espessuras variáveis, terão que ser utilizadas outras técnicas na modelação isostática de *Airy*.

Para aplicar a correcção isostática, é necessário, ainda na caixa de ferramentas da *descompactação* e no separador do ajuste isostático, escolher-se a isostasia de *Airy*, tendo em conta que a secção é submarina na sua totalidade. É referido no tutorial que o valor médio para a densidade da crosta no Golfo do México é de aproximadamente 2680 kgm^{-3} . Assim, utilizando este valor e o valor pré-definido para a densidade do manto, de 3300 kgm^{-3} , aplica-se o algoritmo da *descompactação* e, conseqüentemente, o ajuste isostático da secção (Figura 3.47).

A unidade castanha (Pliocénico) é assim eliminada. As camadas subjacentes (com a excepção do sal que é incompressível) são *descompactadas* sucessivamente e toda a secção é ajustada isostaticamente.

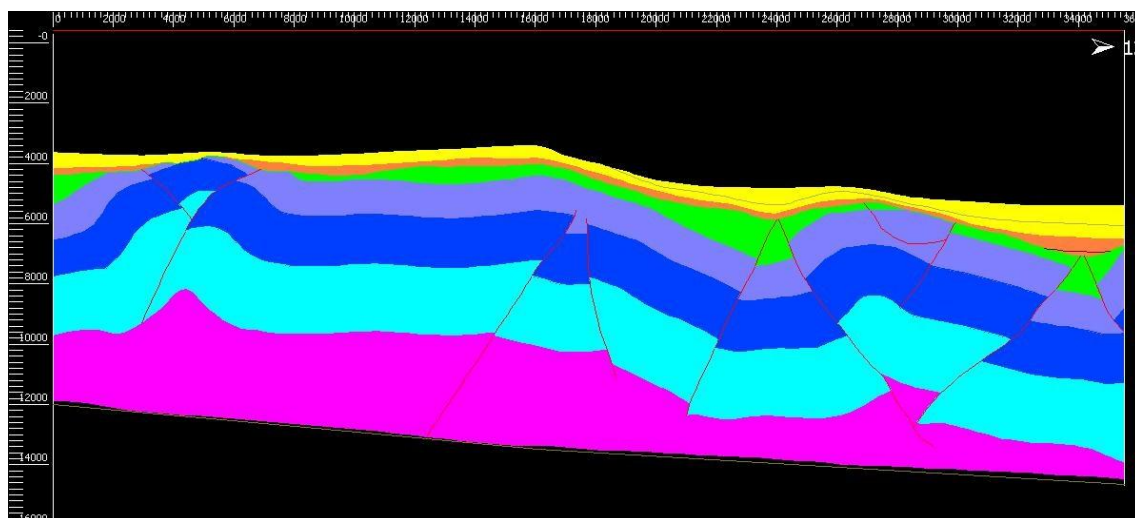


Figura 3.47 – Secção descompactada, após se remover a unidade do Pliocénico. Podem-se observar os efeitos provocados por esta unidade, nas camadas subjacentes.

Restauração de um horizonte a um datum de referência

Para efectuar a *restauração* da unidade do Mio-Pliocénico (a amarelo e correspondente à unidade superficial nesta etapa da *restauração*) a um *datum* de referência, é necessário observar os dados sísmicos originais (Figura 3.41), onde se deverá averiguar se pode ser recolhido algum tipo de informação paleo-batimétrica, referente ao horizonte em estudo. Tal realiza-se examinando os reflectores sísmicos da unidade castanha (que se removeu no passo anterior) e da unidade amarela (unidade que se pretende restaurar).

Neste exemplo, de acordo com o tutorial, existem sinais que indicam que a deformação existente no horizonte amarelo (Mio-Pliocénico) e em horizontes mais antigos ocorreu durante a deposição da unidade castanha (unidade mais superficial). Esta deformação necessita de ser removida e a secção restaurada a um paleo-relevo que corresponda ao final da deposição da camada amarela (Mio-Pliocénico). O tutorial do programa apresenta uma estimativa de uma linha paleo-batimétrica, que será utilizada na *restauração* (Figura 3.48).

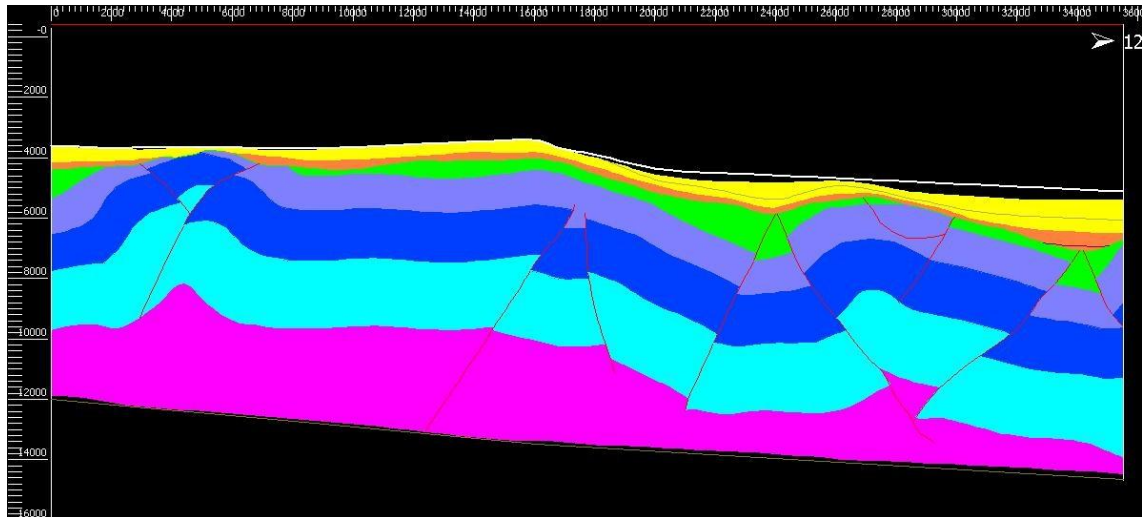


Figura 3.48 - Secção com a linha paleo-batimétrica (a branco) que será utilizada na *restauração*.

Em primeiro lugar, define-se o mecanismo de deformação que se pretende utilizar na *restauração*. Neste exemplo, devido à deformação ser predominantemente compressiva, assume-se que o mecanismo de deformação dominante é de *deslizamento flexural* (*Flexural Slip*), em oposição ao *cisalhamento inclinado* (*Inclined Shear*), mais utilizado em regimes tectónicos extensionais.

Definido o mecanismo de deformação dominante, abre-se a caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold*. Neste caso vai-se restaurar a secção a um *alvo*, que corresponde à linha branca da Figura 3.48. A linha amarela (Mio-Pliocénico) é a linha a ser restaurada e corresponde à linha *modelo*. Todos os restantes objectos, com a excepção da base do sal (linha verde oliva), devem ser considerados como “outros objectos”. Ao excluir-se a base do sal na *restauração*, está-se a modelar o sal de modo a que actue como um nível de descolamento.

Para esse efeito, insere-se um *pin* que intersecte a linha amarela, a linha do *datum* e todos os outros objectos (Figura 3.49), adicionando-o à sua respectiva caixa. A linha amarela e as outras camadas serão restauradas ao longo de um sistema de *deslizamento*, paralelo à linha amarela e perpendicular ao *pin* criado. A posição do *pin* é crítica pois no local onde este se encontra, toda a secção permanecerá fixa.

Quando a caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold* estiver devidamente preenchida e a posição do *pin* correctamente definida, isto é, de modo a que intersecte todos os horizontes existentes, aplica-se o algoritmo.

O horizonte amarelo aparece agora *restaurado* até ao paleo-relevo pretendido (Figura 3.49).

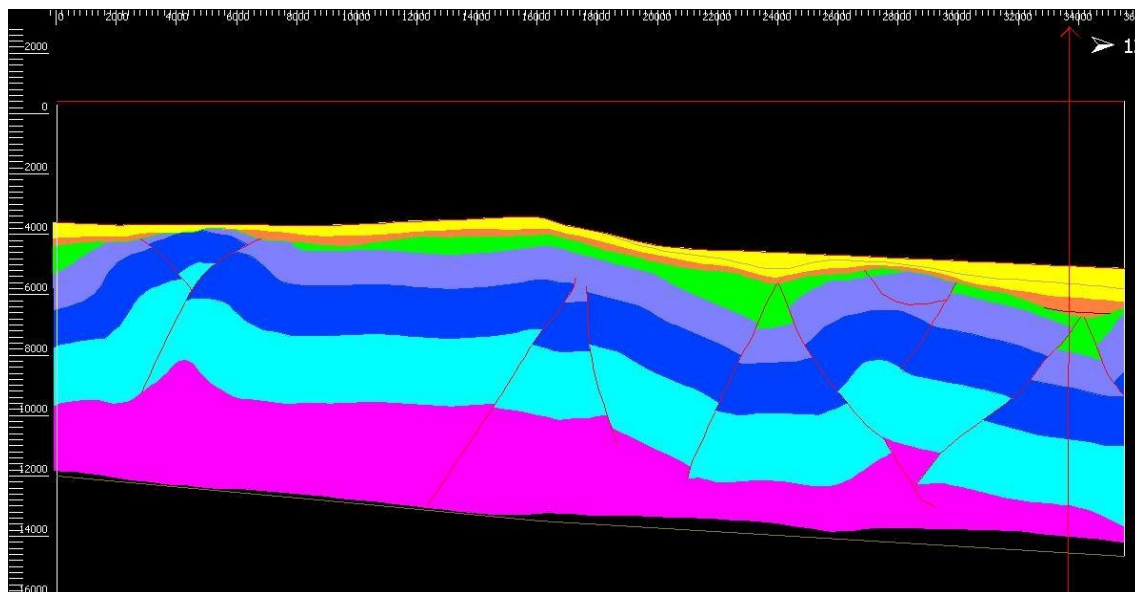


Figura 3.49 - Secção após se aplicar o algoritmo *Flexural Slip Unfolding* com a posição do *pin* (seta vermelha à direita da imagem).

3.3.8. Restauração da camada do Miocénico

Remoção da unidade do Mio-Pliocénico e descompactação da secção

Na caixa de ferramentas da *descompactação*, seleccionam-se as linhas e os polígonos referentes à unidade amarela, adicionando-os ao campo das camadas do “topo”. Também deverão ser adicionados todos os objectos passivos, associados à camada em causa (como é o caso da linha correspondente ao Miocénico Superior). Seleccionam-se todas as linhas e polígonos correspondentes à unidade do Sal (a rosa), adicionando-os como “base”. Por último, seleccionam-se os restantes objectos (à excepção da base do sal (linha verde oliva) adicionando-os como “camadas intermédias”.

Como se pode observar na Figura 3.49, a unidade a remover apresenta uma espessura variável ao longo da secção. Como a modelação com base no modelo de *Airy* é sensível a variações na espessura das camadas e de modo a reduzir quaisquer erros associados a este factor, antes de se efectuar a descompactação da secção é necessário saber a média da resposta isostática, que será provocada pela remoção da unidade superficial (Mio-Pliocénico, a amarelo).

Assim, no separador do ajuste isostático e ainda na caixa de ferramentas da *descompactação*, selecciona-se a isostasia de *Airy*, tendo em conta que a secção é submarina em toda a sua extensão. Como já foi realizado anteriormente, utiliza-se para a densidade da crosta o valor de 2680 kgm^{-3} e para a densidade do manto o valor pré-definido de 3300 kgm^{-3} .

Identificam-se, na unidade a ser removida (Figura 3.49), os locais onde se verificam as espessuras máxima e mínima. No separador do historial de compactação, “pica-se” o local da secção onde a unidade amarela tem a espessura mais fina. De seguida, voltando

ao separador do ajuste isostático, realiza-se uma pré-visualização dos valores do ajuste isostático. Ao realizar esta operação é aberto um documento, que possui informação relativa ao *offset* na posição definida anteriormente. Seguidamente, repete-se este procedimento para o local onde a camada a retirar é mais espessa.

Após se saber a média dos dois valores de ajuste isostático obtidos anteriormente, abre-se a base de dados (Tabela 3.2) e, contrariamente ao que foi realizado para a unidade anterior (unidade do Pliocénico, a castanho), descompacta-se a secção, sem se aplicar o efeito da isostasia (Figura 3.50).

O passo seguinte será mover a secção verticalmente, pela quantidade média (obtida anteriormente), de modo a modelar-se o levantamento isostático provocado pela existência da unidade amarela (Mio-Pliocénico).

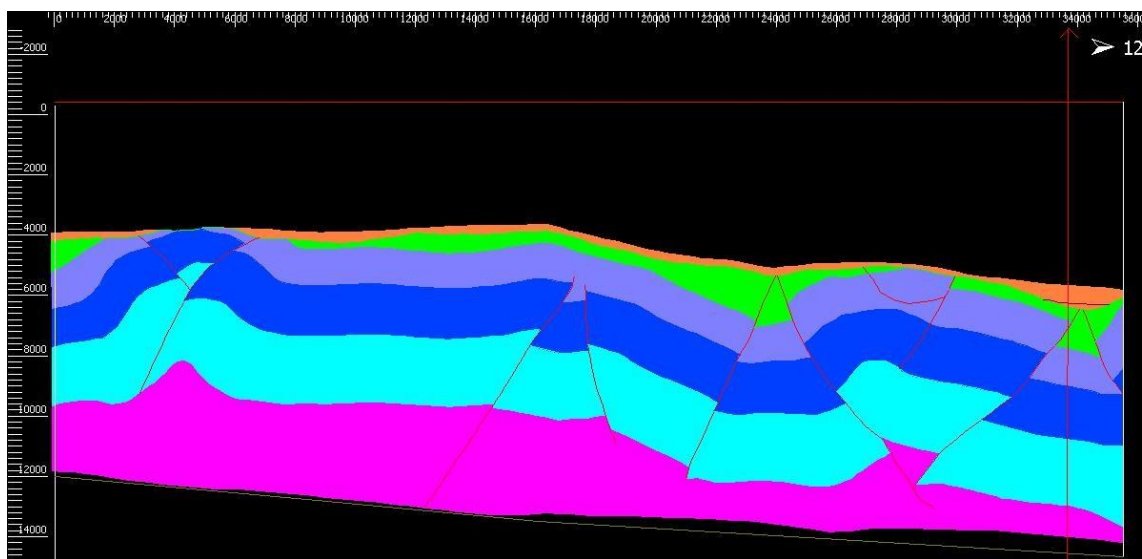


Figura 3.50 – Secção sísmica descompactada. A unidade do Mio-Pliocénico foi removida e é possível observar o efeito desta remoção, nas restantes camadas.

Ajuste isostático de uma camada com espessura variável

Para se modelar o ajuste isostático de *Airy* numa camada com espessura variável, terá que se alterar a secção verticalmente, transformando-a. Assim, seleccionam-se as linhas, os pontos e os polígonos que compõem a secção, excluindo o traço de secção e o *datum*. Abre-se a caixa de ferramentas utilizada para transformar objectos e, do menu existente, escolhe-se a opção de “movimentação”.

O valor do levantamento médio isostático obtido no passo anterior foi de 315.46 m. Então, insere-se este valor na caixa correspondente à profundidade e realiza-se a transformação. Na (Figura 3.51) observa-se que a secção se moveu para uma posição menos profunda.

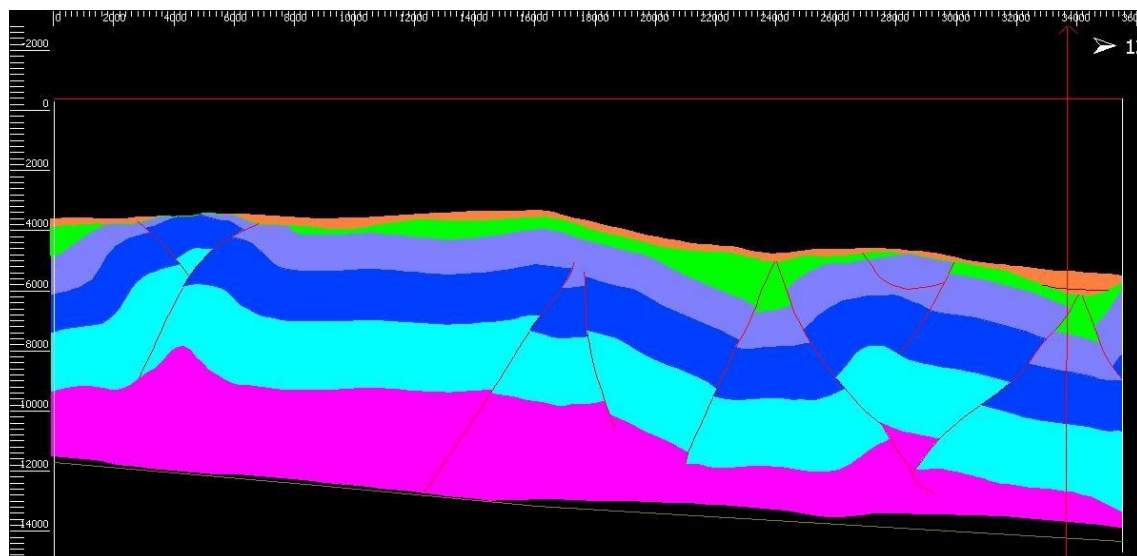


Figura 3.51 – Secção obtida após a realização de uma *transformação vertical* na imagem, de modo a aplicar o levantamento isostático.

A modelação isostática utilizando o modelo de *Airy* é susceptível a unidades que apresentem espessuras variáveis. Por este motivo o resultado obtido é apenas uma mera estimativa.

Restauração da unidade laranja (Miocénico) a um datum regional

Nesta fase, é importante saber qual o espaço de acomodação da unidade laranja (Miocénico) e que quantidade de unidade verde (Oligocénico) foi removida pela erosão que provocou a discordância local.

A única maneira se obter essas informações é recorrer à visualização das características da secção sísmica. Uma discordância angular, implica que ocorreu erosão significativa do material. Contrariamente, se os reflectores (acima e abaixo da discordância) forem predominantemente paralelos, pode significar que as camadas foram deformadas após a discordância ter sido desenvolvida e que não ocorreu muita erosão do material.

A unidade laranja (Miocénico) apresenta-se, paralela às unidades subjacentes. Isto implica que a deformação ocorreu após a unidade verde ter sido depositada. A secção sísmica mostra ainda evidências de ocorrência de erosão na unidade verde (Oligocénico), nomeadamente nas dobras existentes na secção. Este facto apoia a conclusão de que a deformação ocorreu após ter sido depositada a unidade verde (Oligocénico).

Previamente à *restauração* até um *datum* regional e à *descompactação*, deverá ser atribuído um volume à unidade laranja (Miocénico), que inclua a parte que foi erodida. Esta construção deverá ser feita tendo em consideração os dados disponíveis. De modo a inserir-se a quantidade de erosão ocorrida na unidade laranja, apagam-se os polígonos que a definem e adiciona-se a totalidade da unidade, que foi erodida. O tutorial do programa apresenta uma linha que marca o topo da unidade anteriormente à erosão.

Insere-se a linha proposta pelo tutorial e desenha-se o polígono correspondente (Figura 3.52).

Tendo em conta as considerações anteriores, deve ser escolhido um *datum* que contemple todos os dados, antes de se seguir com a *restauração*. Como neste exemplo não são fornecidos dados de poços que permitam retirar conclusões relativamente à paleo-batimetria existente, devem-se ter em consideração as evidências da geologia regional, utilizadas para explicar a deformação ligada ao sal.

É indicado no tutorial, que o modelo regional utilizado é o modelo de deslizamento gravitacional. Este deslizamento provocou um movimento da secção, para um local acima do *datum* regional. De modo a remover este deslizamento, analisa-se o ponto onde a unidade laranja se encontra relativamente indeformada, que no caso da secção sísmica em estudo, corresponde ao local do *pin* que se encontra situado à direita da secção (Figura 3.52). Assim, desenha-se (a vermelho, Figura 3.52) uma linha denominada de “regional”, que corresponde ao *datum* regional assumido.

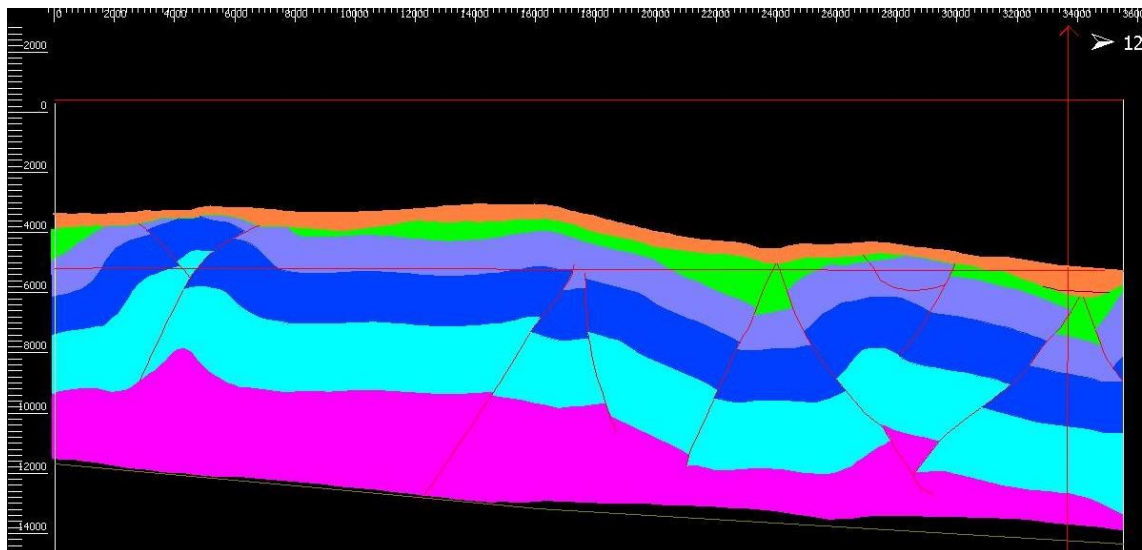


Figura 3.52 – Secção com o topo da unidade laranja redesenhado e com o *datum* regional (linha a vermelho) inserido na secção. O *pin* utilizado corresponde ao local da secção considerado como não deformada.

O estilo de deformação ocorrido é de *deslizamento flexural*. Na caixa de ferramentas relativa a este algoritmo, escolhe-se como *alvo* o novo *datum* desenhado, como “linha *Template*” a nova linha laranja (Miocénico) construída, e como “outros objectos” os restantes objectos que definem a secção (com a excepção da base da secção). Adiciona-se o *pin* ao seu respectivo campo, estende-se o *datum* à direita e à esquerda e aplica-se o algoritmo (Figura 3.53).

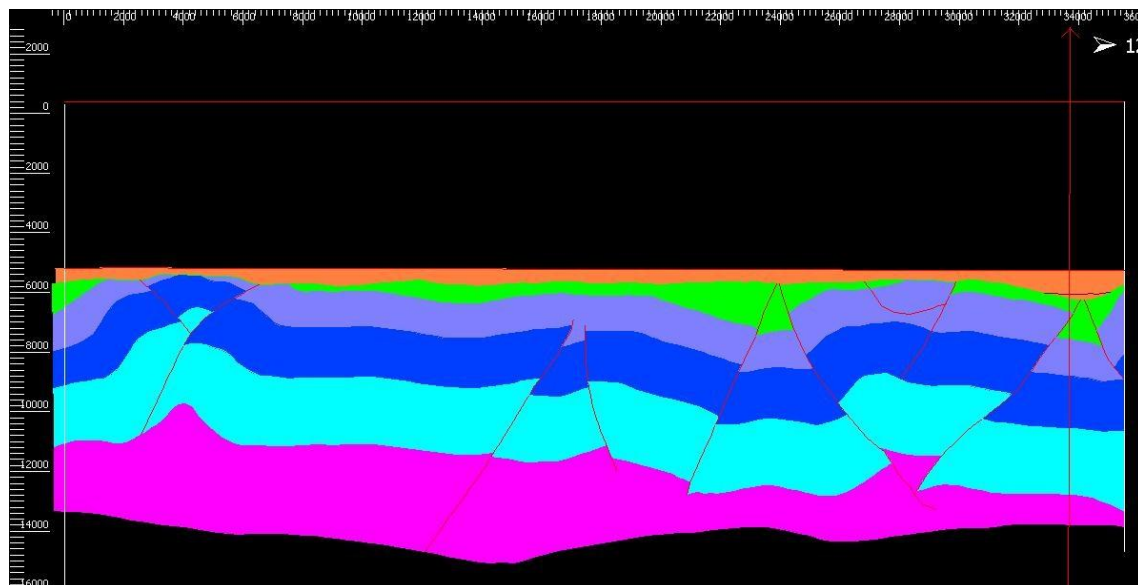


Figura 3.53 – Unidade laranja (Miocénico) restaurada a um *datum* regional.

O horizonte laranja (Miocénico) é assim restaurado até ao *datum* (linha desenhada a vermelho), ou seja, restaurado a nível regional. Tal como anteriormente, ao ser excluída a base da secção (linha a verde oliva) pré sal, modela-se o sal para que actue como um nível de descolamento.

3.3.9. Restauração da camada do Oligocénico

Descompactação e ajuste isostático

Como a espessura da unidade laranja (Miocénico) varia ao longo da secção, determina-se o valor da média da isostática, utilizando o modelo de *Airy*, do mesmo modo que se procedeu anteriormente para a unidade amarela (secção 3.3.8). O valor obtido será posteriormente utilizado, quando for efectuado o ajuste isostático provocado pela *descompactação* desta unidade.

Após ter sido determinada a média do levantamento isostático, realiza-se a *descompactação* da secção, que é provocada pela remoção da unidade laranja do Miocénico (Figura 3.54).

Tal como foi realizado anteriormente para a unidade amarela (secção 3.3.8), efectua-se agora o ajuste isostático da secção, utilizando o modelo de *Airy*, que é provocado pela remoção da unidade laranja (Miocénico). Na determinação da média isostática para a unidade laranja, foi obtido um valor de 231.98 m, logo utiliza-se este valor na transformação que move a secção verticalmente (Figura 3.55).

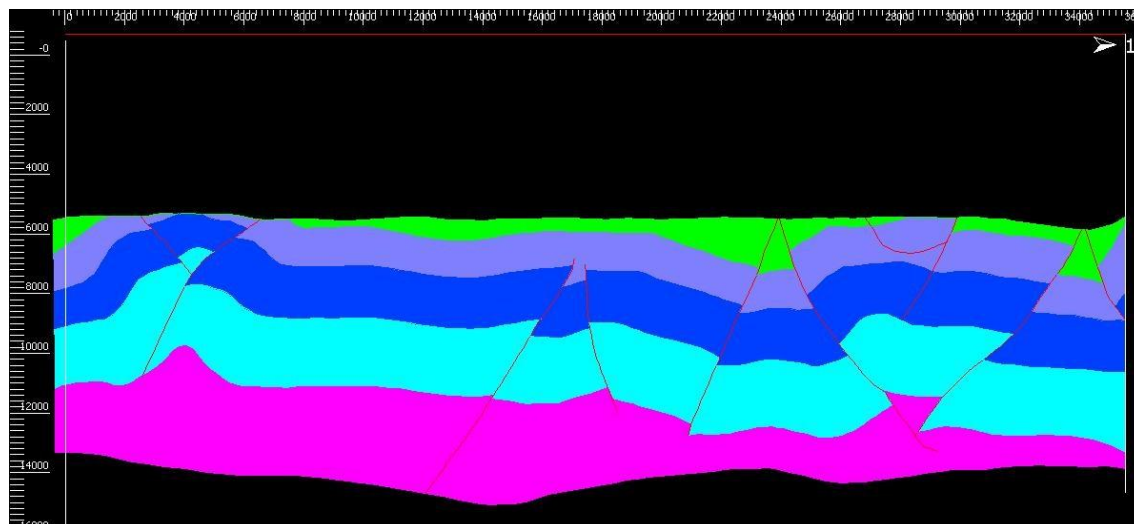


Figura 3.54 – Descompactação da secção, provocada pela unidade laranja (Miocénico) e sem o ajuste isostático.

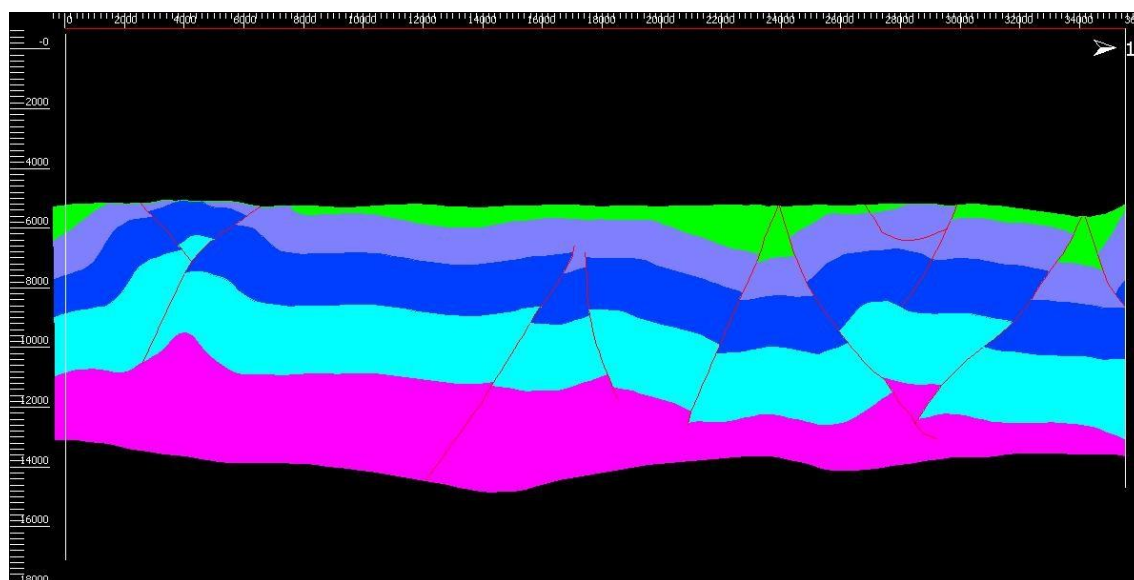


Figura 3.55 – Secção ajustada isostaticamente, após a descompactação.

Restituição de uma superfície de erosão

Visualiza-se novamente a imagem sísmica original (Figura 3.41), tendo em especial atenção a unidade verde (Oligocénico). Esta unidade constitui um estado crítico na evolução estrutural da secção. É necessário determinar se a unidade verde é sin- ou pré-tectónica com a maior fase de deformação e se as falhas e o dobramento terão ocorrido contemporaneamente ou se o material terá sofrido compressão e ter depois sido falhado. É também necessário estimar a quantidade de material que foi erodido.

Constroem-se as unidades correspondentes ao Cretácico-Paleocénico (azul), ao Eocénico (azul acinzentado) e ao Oligocénico (verde). De modo a realizar esta operação, apagam-se os polígonos cortados pelo fundo do mar *restaurado*, tal como está

representado na Figura 3.56. Esta operação permite a construção destas camadas, de modo a serem visualizadas mais claramente.

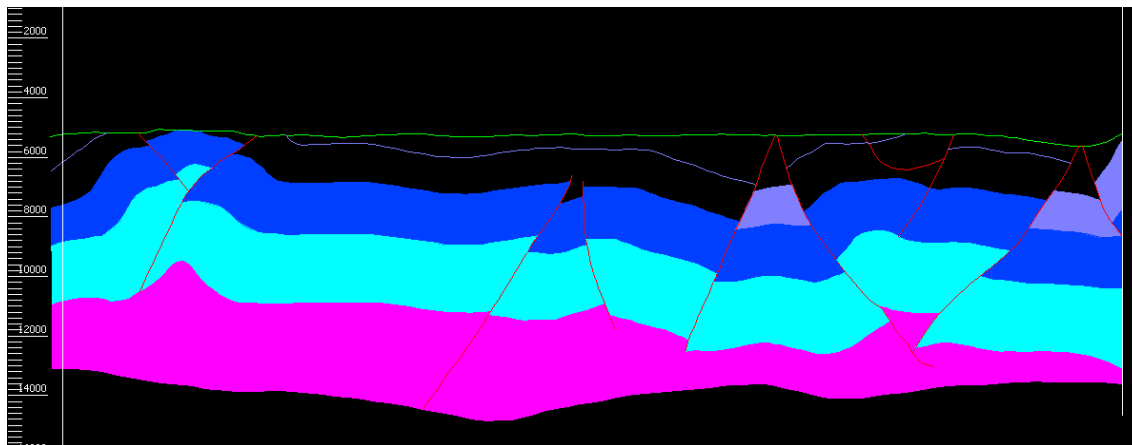


Figura 3.56 – Aspecto da secção após terem sido removidos os polígonos cortados pelo fundo do mar, nesta etapa da *restauração*.

Observando a secção da Figura 3.56, verifica-se que a primeira unidade a ser construída, será evidentemente a unidade azul (Cretácico-Paleocénico) no único local onde esta unidade é cortada pela descontinuidade, ou seja, no anticlinal situado entre as duas falhas mais à esquerda da secção.

De modo a construir esta unidade, existe no 2DMove, uma função de construção de camadas. Abre-se a respectiva caixa de ferramentas e selecciona-se a linha a azul claro (Cretácico Médio), que se situa entre as falhas do extremo esquerdo da secção, adicionando-a como “camada”. Esta linha será usada como *modelo* na construção do horizonte azul (Cretácico-Paleocénico). A construção é efectuada acima da camada e cria-se a nova linha, tal como demonstra a Figura 3.57.

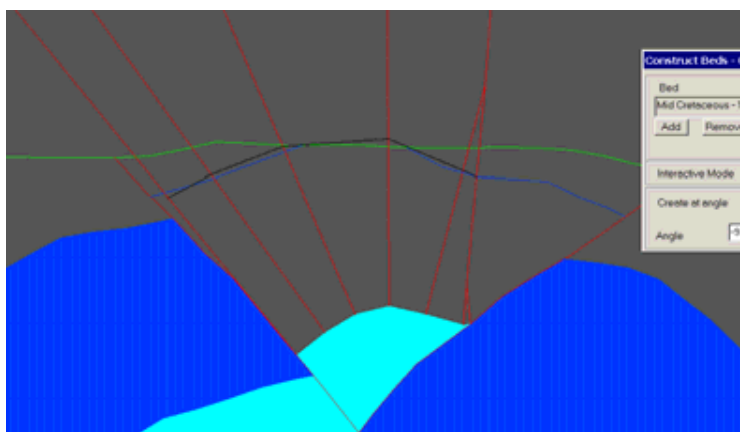


Figura 3.57 – Construção de um horizonte erodido.

Mede-se a espessura máxima ortogonal da camada azul ao longo da secção, utilizando a ferramenta de medição existente no 2DMove. A espessura máxima conhecida nesta secção para a camada em questão é de 1440 m, pelo que se insere esse valor na “altura” da camada. Como se verifica um aumento na espessura das unidades para a esquerda

da secção, é necessário inserir um ângulo aquando a criação da camada (secção 2.5). Para este exemplo o ângulo é de aproximadamente 10°.

Após se criar a linha com a orientação e altura desejadas, corta-se e junta-se o novo segmento criado, à linha já existente para assim construir a parte erodida da unidade azul (Creácico-Paleocénica, Figura 3.58). Nesta etapa é importante verificar-se o nome e os atributos deste novo horizonte construído. Constrói-se o polígono em causa, finalizando assim a construção da camada azul (Cretácico-Paleocénico).

Este horizonte é agora usado como camada *modelo*, na construção da parte erodida da unidade roxa (Eocénico). Para este caso utiliza-se o modo interactivo, de modo a inserir-se correctamente o horizonte com o ângulo e a altura que melhor se adaptem aos segmentos de linha já existentes (Figura 3.59).

Atribui-se o nome e a cor adequados ao novo horizonte e desenha-se o respectivo polígono. Repete-se o procedimento descrito anteriormente, agora para a camada mais superficial (verde, Figura 3.60). Após se atribuir o respectivo nome ao horizonte e de se desenhar o polígono, a secção fica completamente construída (Figura 3.61).

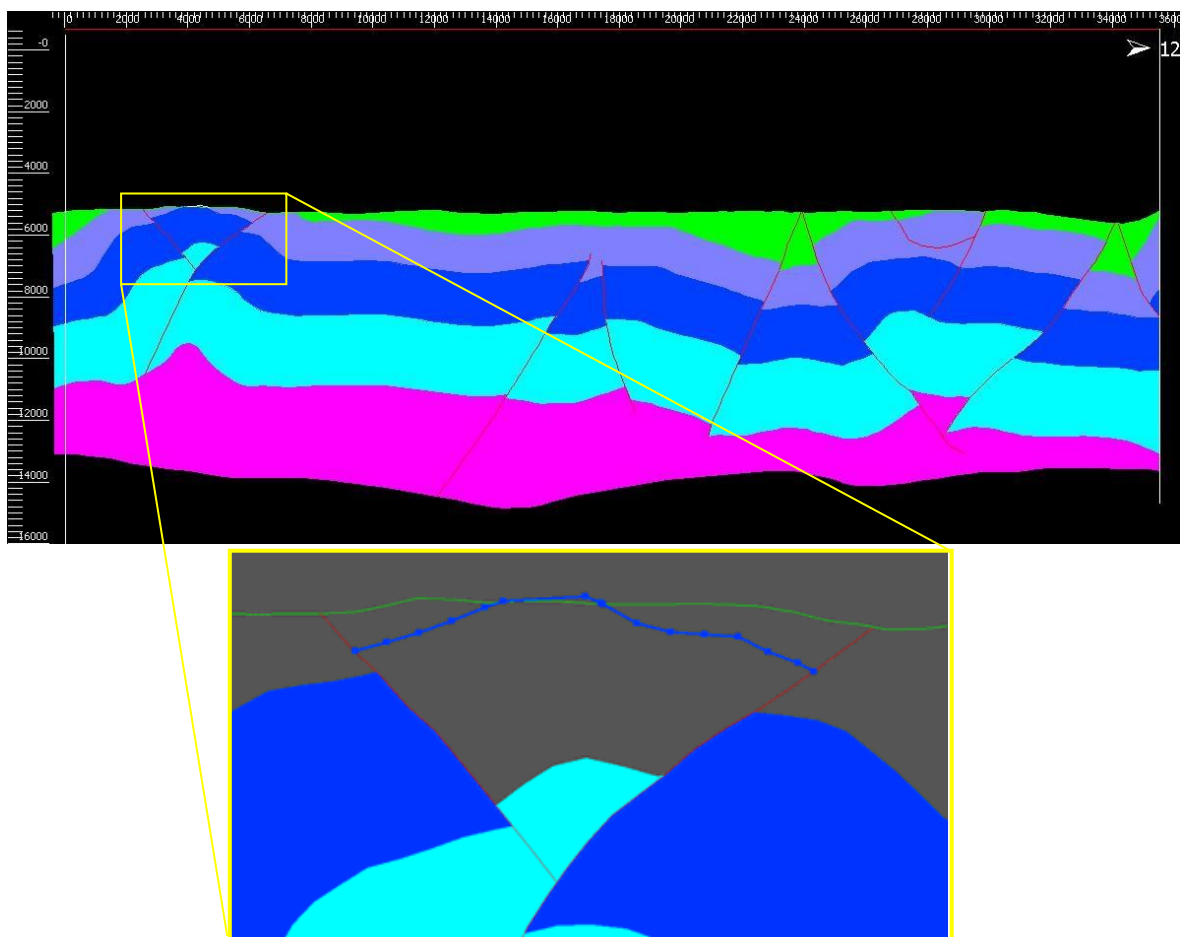


Figura 3.58 – Horizonte do topo da camada azul (Cretácico-Paleocénico) construído.

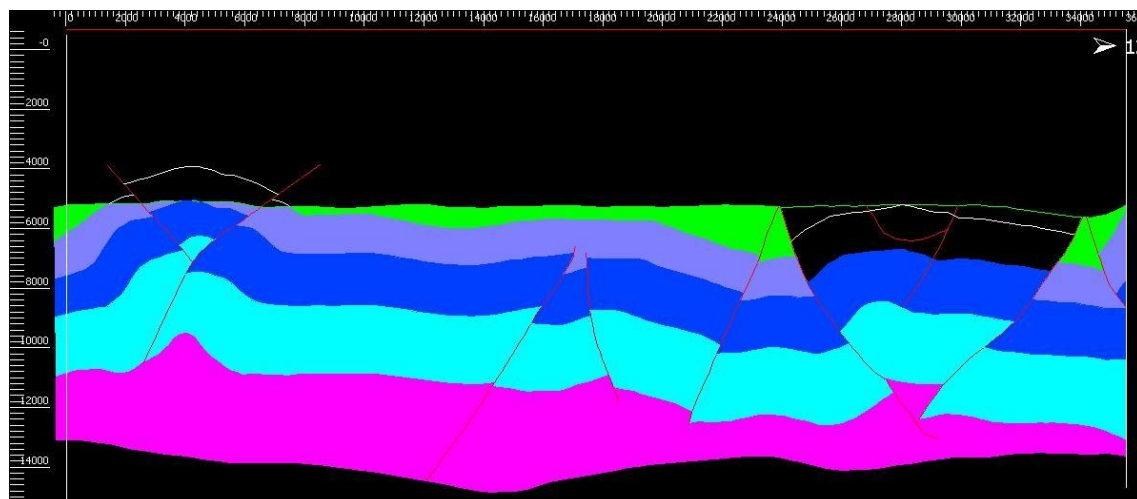


Figura 3.59 – Horizonte do topo da camada roxa (Eocénico) construído.

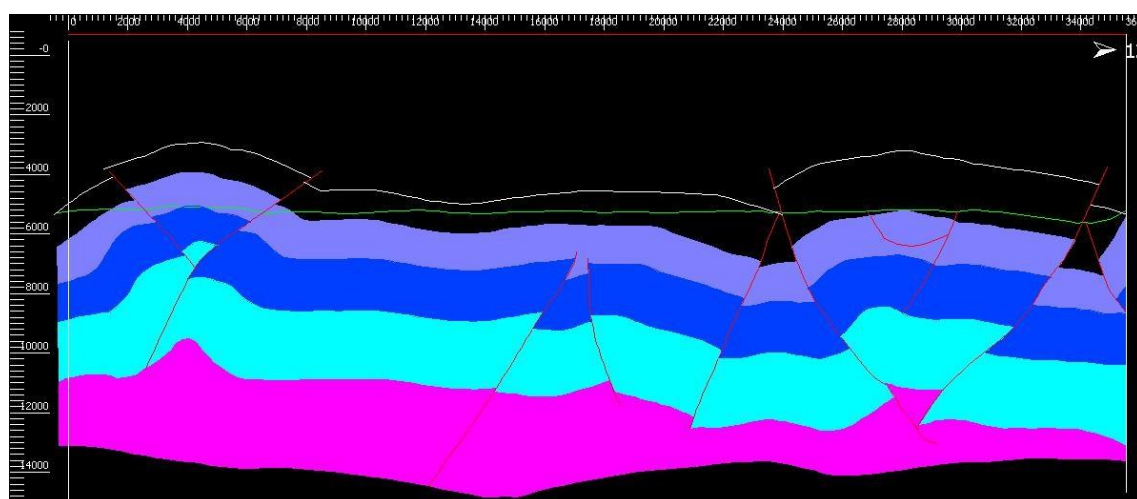


Figura 3.60 - Horizonte do topo da camada verde (Oligocénico) construído.

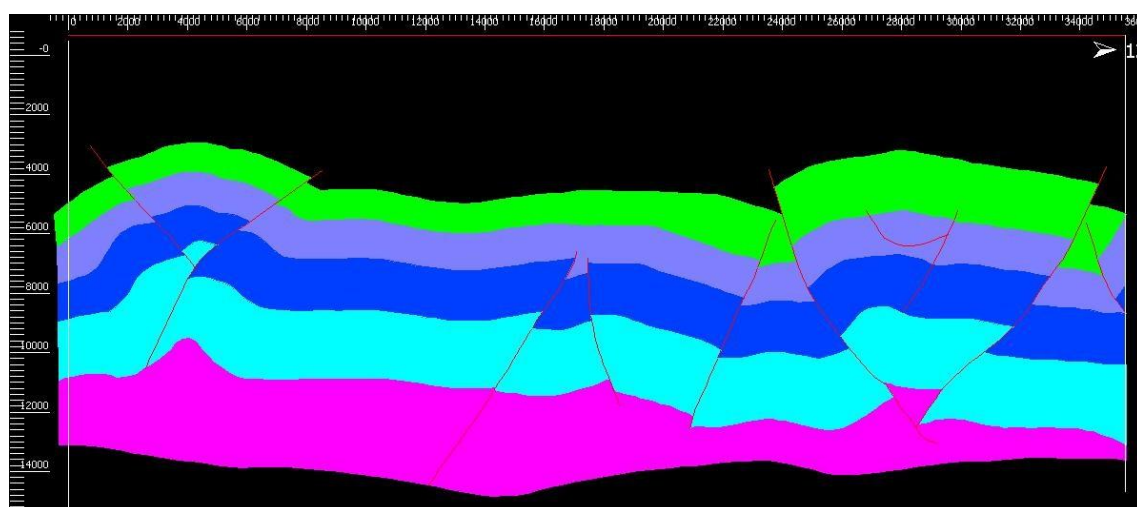


Figura 3.61 – Secção com as camadas erodidas completamente construídas.

Analisando a secção da Figura 3.61, pode-se concluir que a maior parte da deformação ocorreu após a deposição da unidade verde (Oligocénico), pois esta unidade apresenta-se afectada pelas falhas existentes. Ao observar-se as unidades verde e roxa construídas, pode-se verificar que estas vão espessando para a direita da secção.

Antes de se restaurar a secção a um *datum* regional, é necessário remover a deformação causada pelas falhas. Portanto, o próximo passo será restaurar as falhas existentes, de modo retirar-lhes o rejeito.

Restauração das falhas existentes na secção

Em primeiro lugar, terá que se saber qual o modo de deformação das rochas afectadas pelas falhas, para assim decidir qual o algoritmo de deformação utilizar. O algoritmo *Fault Parallel Flow* assume que o mecanismo de deformação dominante é de *deslizamento flexural*, ou seja, que as camadas movem-se entre si por *deslizamento flexural* em vez de se deformarem internamente por *cisalhamento (Inclined shear)*. Tendo em conta que a secção envolve estruturas compressivas devidas à presença de sal, o algoritmo *Fault Parallel Flow* é o mais indicado.

Utilizando então o algoritmo *Fault parallel Flow*, *restaura-se* cada um dos blocos de falha existentes. Existem cinco falhas principais. Os blocos delimitados pelas falhas encontram-se numerados na Figura 3.62. Como se pode verificar da figura, nem todas as falhas afectam a unidade verde (Oligocénico). As falhas que afectam todas as unidades, deverão ser restauradas primeiro, seguidas daquelas cujo rejeito apenas afecta algumas unidades da secção. As falhas que delimitam o bloco 3, apresentam um rejeito menor, pelo que a *restauração* será efectuada relativamente a este bloco.

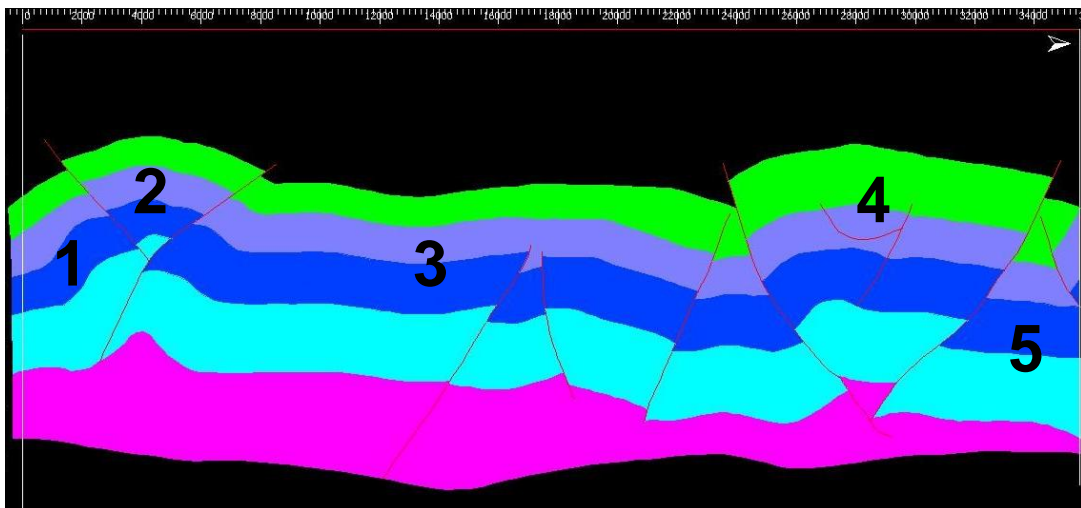


Figura 3.62 – Secção com os blocos identificados.

Assim, será *restaurado* em primeiro lugar o movimento da falha situada entre os blocos 3 e 4 e depois o da falha situada entre os blocos 4 e 5. Tanto o bloco 1 como o 2 correspondem ao muro da falha existente entre os blocos 2 e 3 e serão reconstruídos juntamente, relativamente ao bloco 3. Por último, irá ser *restaurado* o movimento da falha entre os blocos 1 e 2.

Tendo em conta a ordem de restauração referida, adiciona-se na caixa de ferramentas do *Fault Parallel Flow* a falha situada entre os blocos 3 e 4 ao campo de “falha”, estendendo-a automaticamente à esquerda e à direita, para que a porção do tecto da falha acima do ponto onde ela termina seja também movida.

É importante para a *restauração* da secção sísmica, separar-se a secção ao longo da falha, pois os polígonos que representam a unidade do sal (a rosa) deverão encontrar-se separados, para que sejam movidos durante a *restauração* da falha.

Seleccionam-se todos os objectos correspondentes ao tecto da falha, tal como demonstra a Figura 3.63, adicionando-os como “objectos a serem movidos”. Neste caso, o tecto da falha corresponde aos blocos 4 e 5 (Figura 3.62).

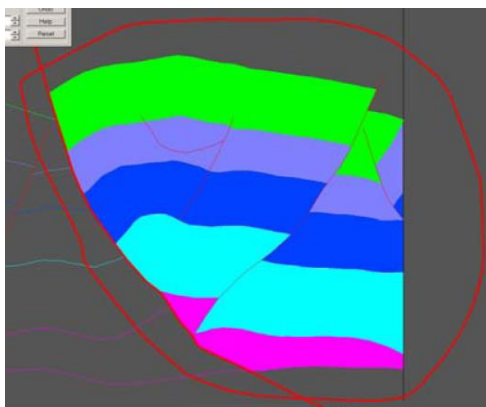


Figura 3.63 – Seleção dos objectos que serão movidos na *restauração* da falha, situada entre os blocos 3 e 4.

A *restauração* será realizada utilizando o método de junção de camadas. Deste modo, insere-se o topo do horizonte verde à direita da falha pretendida, como “tecto da falha” e o topo do horizonte verde à esquerda da falha, como “muro da falha”. Com todos os campos devidamente preenchidos, aplica-se o algoritmo (Figura 3.64).

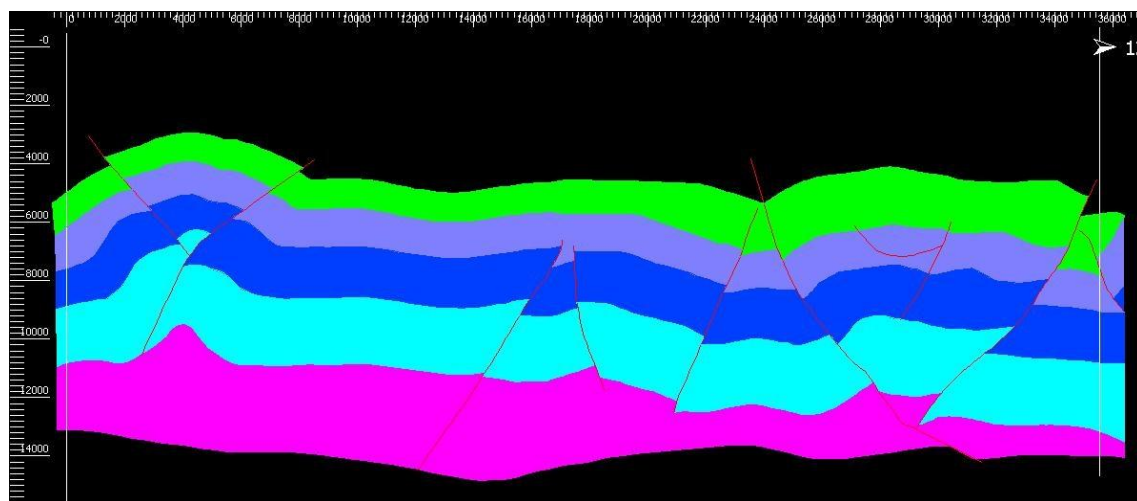


Figura 3.64 – Blocos 4 e 5 restaurados relativamente ao bloco 3.

Seguidamente restaura-se o movimento da falha situada entre os blocos 4 e 5. Selecciona-se a falha em questão, adicionando-a à caixa da “falha” e estendendo-a à esquerda e à direita. Separa-se a secção por esta falha e inserem-se todos os objectos à esquerda da falha aos “objectos a serem movidos”. Utilizando o método de junção de camadas, em que a linha verde do bloco de falha 4 corresponde ao “tecto da falha” e a linha verde do bloco de falha 5 corresponde ao “muro da falha”, aplica-se o algoritmo (Figura 3.65).

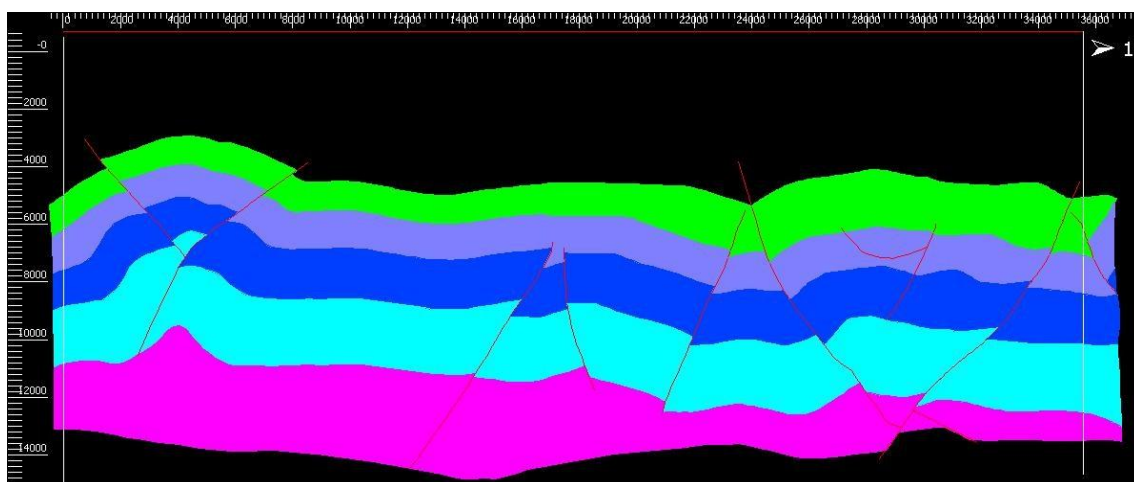


Figura 3.65– Bloco 5 restaurado relativamente ao bloco 4.

Utiliza-se a mesma metodologia de modo a restaurar o movimento dos blocos de falha 1 e 2 relativamente ao bloco 3 (Figura 3.66) e, por último, o bloco de falha 1 relativamente ao bloco 2 (Figura 3.67).

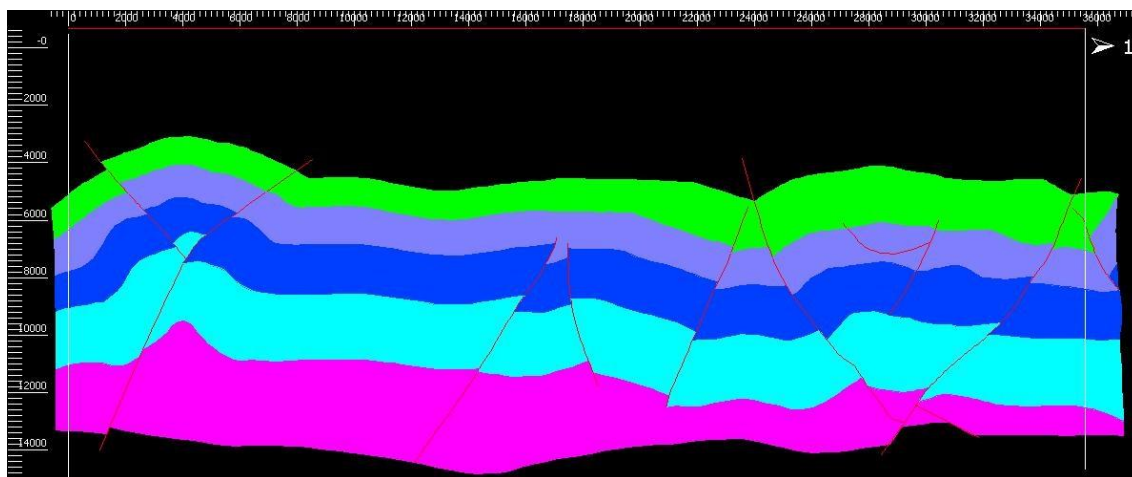


Figura 3.66 – Blocos 1 e 2 restaurados relativamente ao bloco 3.

No próximo tipo de *restauração*, será necessário inserir um *datum* regional, que corresponderá à linha na qual será restaurada a unidade verde (Oligocénico). Segundo o tutorial, a decisão sobre a extensão dos materiais erodidos é importante pois, caso tenham existido mini bacias no Oligocénico, as camadas subjacentes serão sobre

restauradas, e vice-versa. Portanto, as características sísmicas nestas unidades podem proporcionar informações importantes, muito úteis nos passos seguintes.

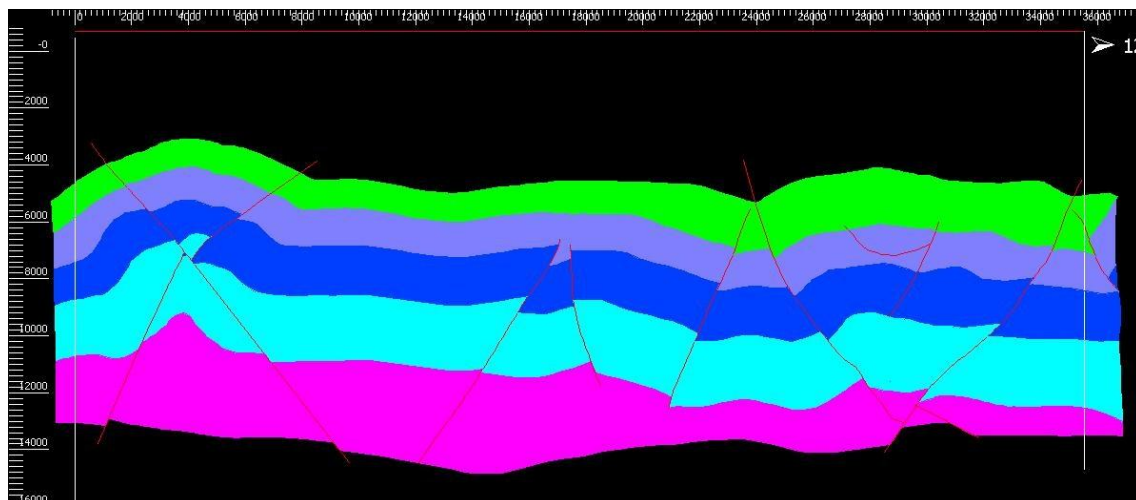


Figura 3.67 – Bloco 1 restaurado relativamente ao bloco 2.

Restauração do Oligocénico a um datum regional

Após o deslocamento vertical das falhas ter sido restaurado, é necessário remover a componente de deformação horizontal, realizando uma *restauração* a um *datum* regional.

Caso exista alguma evidência firme de uma paleo-batimetria, a partir de dados sísmicos ou de dados de poços, realiza-se a *restauração* até esse *datum*. O tutorial apresenta um *datum* sugerido e uma posição para o *pin* que se terá que criar, neste passo da *restauração* (Figura 3.68).

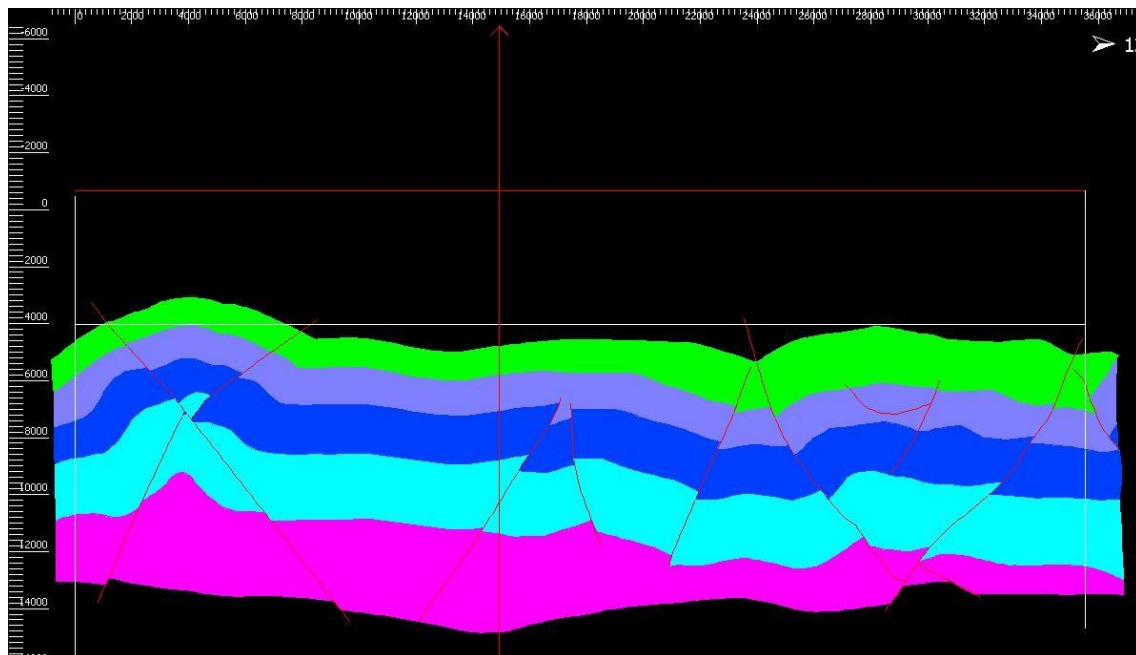


Figura 3.68 – Posição sugerida pelo tutorial para o *pin* (a vermelho) e para o *datum* (a branco).

Inserir-se um *datum* aproximadamente a 4000 m de profundidade e utilizando o algoritmo *Flexural Slip Unfold*, restaura-se a secção até ao *datum*, do mesmo modo que se procedeu anteriormente na *restauração* de outras unidades. Ao ser aplicado o algoritmo, a secção é restaurada até ao *datum* regional escolhido (Figura 3.69).

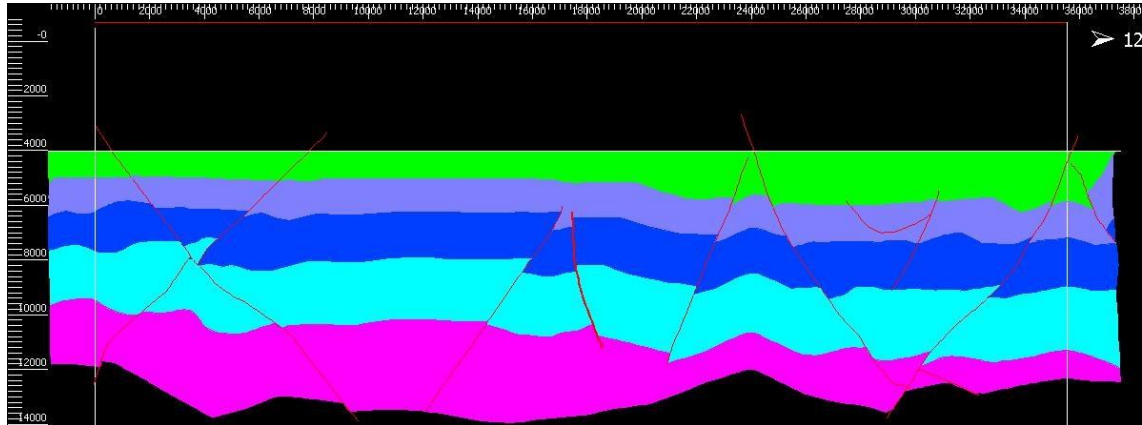


Figura 3.69 – Restauração da unidade do Oligocénico (a verde) até ao *datum* regional.

3.3.10. Descompactação do pré-Oligocénico

Descompactação e ajuste isostático

A unidade que se irá remover, tal como se pode observar na Figura 3.69, tem uma espessura variável ao longo da secção. Como a isostasia de *Airy* é sensível a variações laterais na espessura, serão introduzidos erros ao modelo. Portanto, de modo a minimizar estes erros, deverá realizar-se a *descompactação* da secção devida à remoção da camada do Oligocénico (Figura 3.70) e o devido ajuste isostático (Figura 3.71), usando a mesma metodologia descrita anteriormente na secção 3.3.8, para a unidade amarela (Mio-Pliocénico). Neste caso, irá movimentar-se a secção na vertical de 834.965 m, valor obtido para a média isostática, utilizando o modelo de *Airy*.

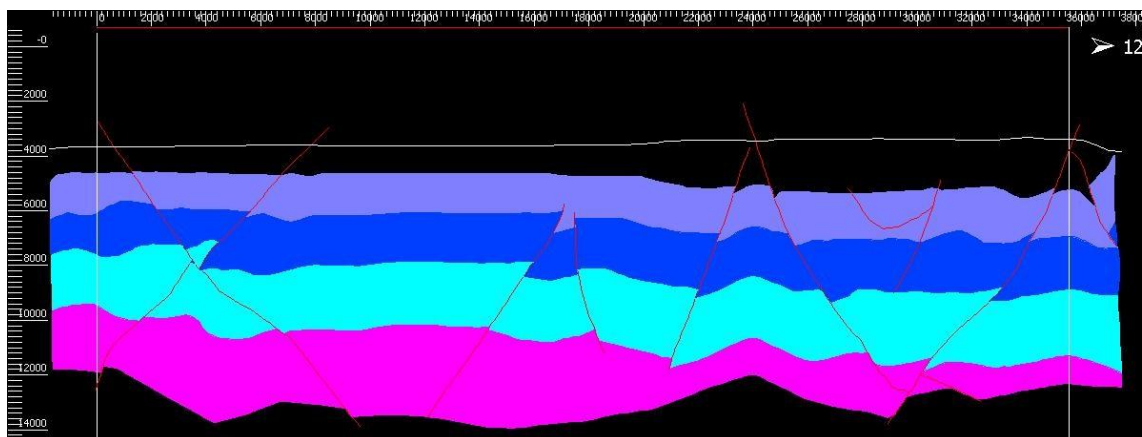


Figura 3.70 – Descompactação da secção, provocada pela unidade verde.

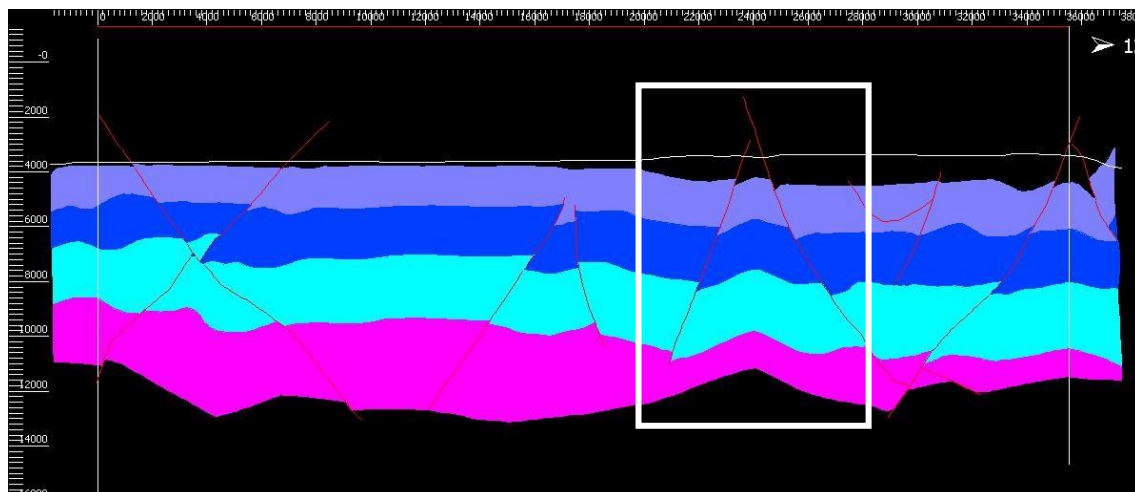


Figura 3.71 – Ajuste isostático das camadas subjacentes à unidade verde (Oligocénico).

3.3.11. Comentários finais

Na Figura 3.71 está destacada uma parte da secção que no início da *restauração* correspondia a um sinclinal e que ao longo dos vários passos de *restauração*, transformou-se num anticlinal. Segundo o tutorial, esta é uma alteração fundamental e dificilmente explicável geologicamente.

A informação relativa à geologia regional, na secção 3.3.5, indicava o topo do Eocénico preservado (a azul acinzentado) como a fronteira aproximada entre as camadas pré-cinemáticas e as camadas sin-cinemáticas. No entanto, após a *restauração* das falhas que afectam a unidade do Eocénico (Figura 3.72), verifica-se que estas afectam também as unidades pré-Eocénicas.

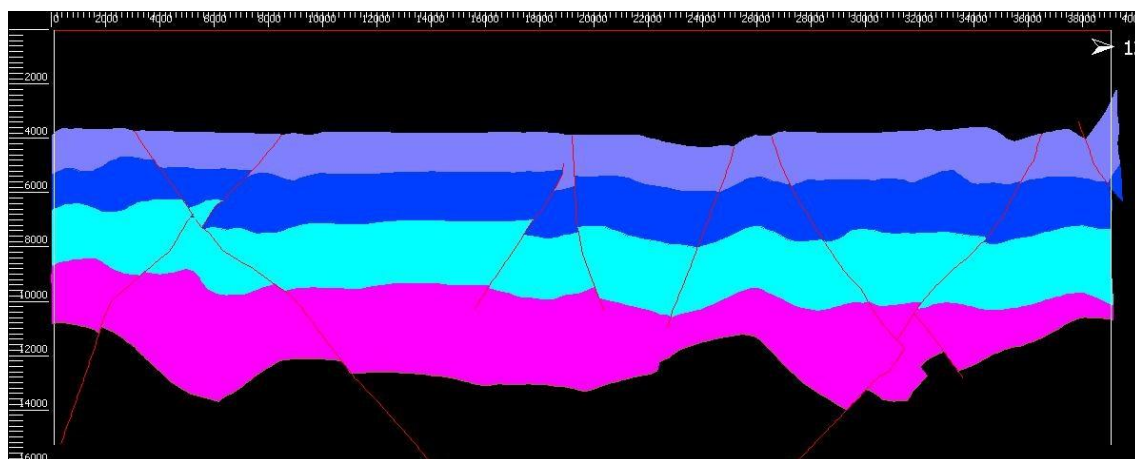


Figura 3.72 – Eocénico com as falhas restauradas.

Das observações à secção da Figura 3.72, segundo o tutorial do programa, podem ser retiradas duas conclusões, ou a interpretação original da secção está incorrecta ou a idade de deformação proposta necessita de ser refinada, de modo a incluir um período de deformação e movimentação de falhas, anterior ao Eocénico.

Por uma questão de segurança, pode-se reinterpretar a secção sísmica em estudo de modo a conferir este resultado, isto é, se as falhas continuam a mostrar rejeito anteriormente ao Eocénico.

Outro procedimento seria reinterpretar a secção da Figura 3.72 para que as unidades anteriores ao Eocénico não se encontrem afectadas pelas falhas existentes e, seguidamente, efectuar-se uma modelação até à actualidade, utilizando a metodologia inversa à utilizada na *restauração*. Por último, comparar a secção final obtida, com a secção inicial dada pela Figura 3.38.

Se após a reinterpretação da secção sísmica as falhas ainda demonstrarem rejeito pré-Eocénico ou se após a modelação até à actualidade a comparação dos dados da secção obtida com a secção original forem diferentes, significa que ocorreu realmente movimentação, previamente à deposição do Eocénico.

Capítulo 4. Estudo de uma secção sísmica situada na margem Norte do Canadá

4.1. Enquadramento Geológico

A zona em estudo, situa-se geograficamente no offshore do Mar de Beaufort a Norte do Delta do Rio Mackenzie, na margem Norte do Canadá (Figura 4.1). A margem continental do Mar de Beaufort é provavelmente o segmento mais conhecido das margens do Oceano Ártico. Este conhecimento resulta da interpretação de um grande conjunto de dados de geologia e geofísica que definem a arquitectura crustal, as tendências estruturais regionais e a evolução tectónica desta região (Lane, 2002).

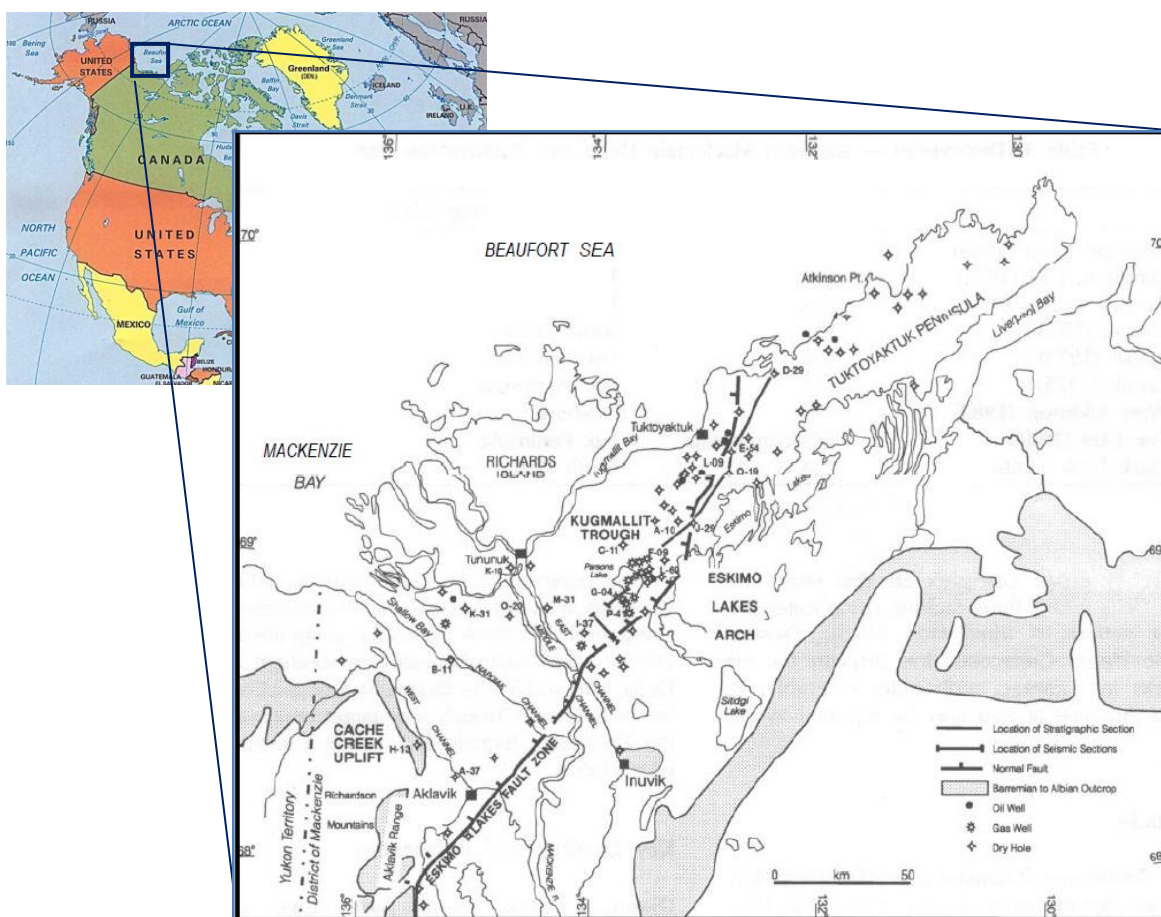


Figura 4.1 – Localização geográfica do Mar de Beaufort (Morrell, 1995). Na figura pode-se observar a Península de Tuktoyaktuk, a Ilha de Richards e a Baía do Mackenzie.

4.1.1. Domínios estruturais

A região Norte do Canadá, onde se insere a área de estudo (Figura 4.2) pode ser dividida em quatro domínios estruturais principais, segundo Dixon e Dietrich et al. (2005):

- Cratão Estável Norte-americano (Stable Craton);
- Margem Sudeste da Bacia do Canadá;
- Cordilheira Oeste Americana (Cordilleran Fold Belt);
- Bacia do Canadá.

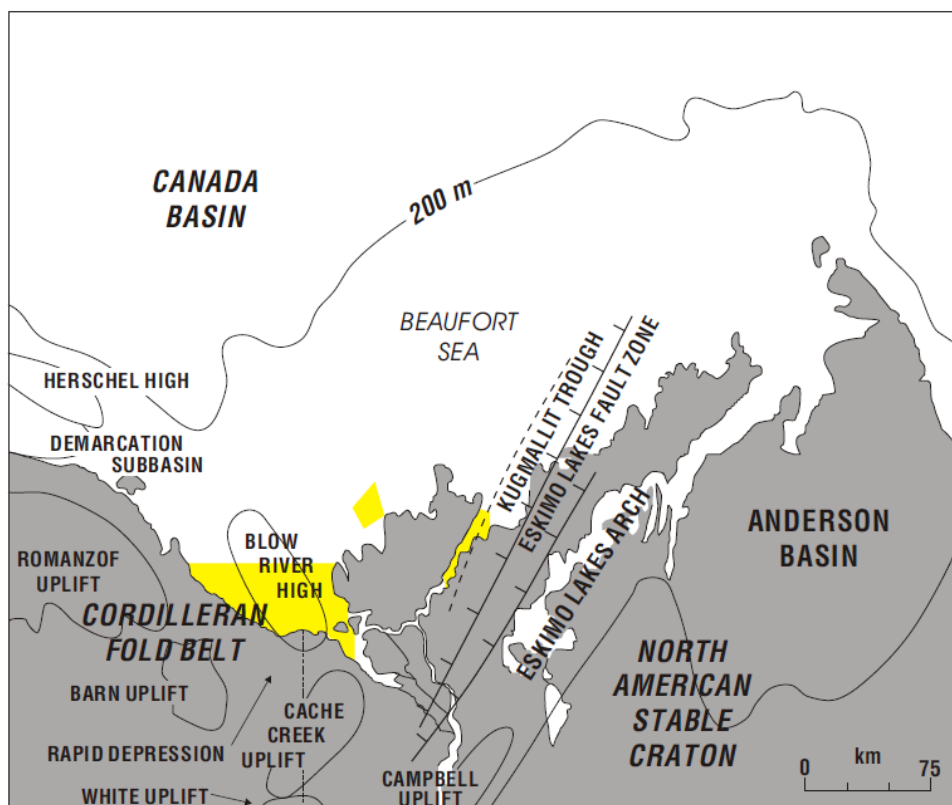


Figura 4.2 – Localização geográfica dos domínios estruturais principais na região do Delta do Mackenzie e no Mar de Beaufort. As zonas a amarelo correspondem, da esquerda para a direita, à baía do Mackenzie, à ilha de Kendel e à Baía de Kugmallit (Dixon et al., 2005).

O Cratão Estável abrange as regiões a Este de Peel (Figura 4.3) e a Sul da península Tuktoyaktuk (Figura 4.1), onde os estratos Paleozóicos e Mesozóicos se sobrepõem a uma sucessão Proterozóica espessa (Norris, 1997). A cunha sedimentar do Paleozóico (que aumenta de espessura a Oeste), encontra-se deformada progressivamente para Oeste, enquanto que a sucessão Mesozóica menos espessa, na mesma região se encontra levemente dobrada (Dixon et al., 2005).

A margem falhada do Sudeste da Bacia do Canadá na península de Tuktoyaktuk (Figura 4.1) faz fronteira com o Cratão Estável e possui grandes falhas sin-sedimentares que se estendem no *offshore* em direcção a Nordeste. A maior parte do movimento nestas falhas

está associado ao rifting Mesozóico, durante a abertura e a formação da Bacia do Canadá (Lane, 1998).

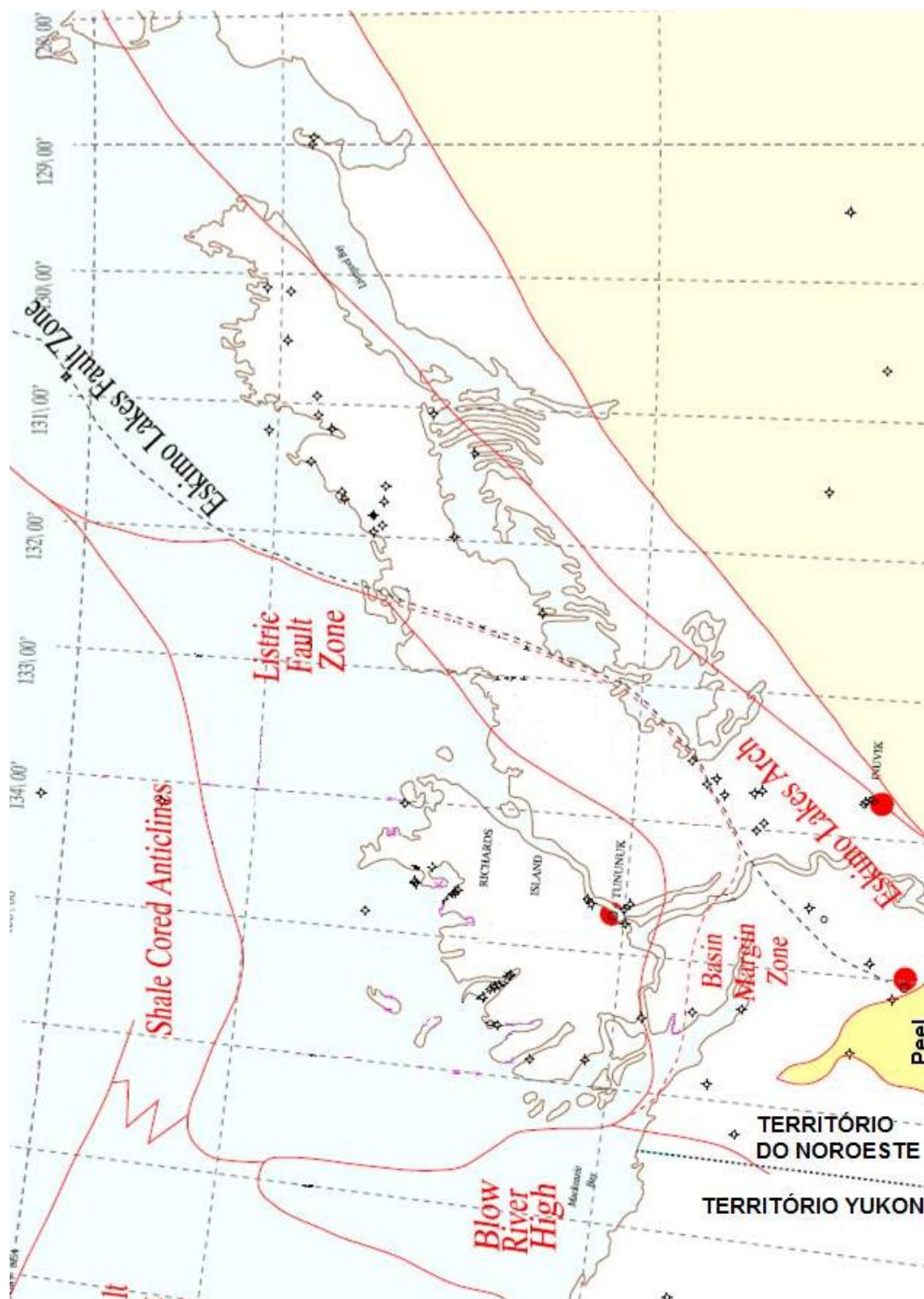


Figura 4.3 – Imagem com a delimitação das principais estruturas existentes no Delta do Rio Mackenzie e no Mar de Beaufort (Harris et al., 2004).

Os estratos da faixa de dobramento da Cordilheira Oeste Americana encontram-se intensamente deformados e estendem-se para a parte ocidental do Mar de Beaufort (Dixon et al., 2005).

Sob a Bacia do Canadá encontra-se crosta oceânica e transicional coberta por sucessões sedimentares (Lane, 1998; Lane, 1997; Dixon, 1995; Dixon et al., 1994). Os estratos do Neogénico na parte ocidental do Mar de Beaufort estão deformados numa faixa de dobramento que se dissipa na direcção Nordeste e em direcção à Bacia (Dixon et al., 2005).

Perto da costa, as dobras assimétricas são frequentemente cortadas por falhas verticais. Na zona mais profunda da Bacia, as dobras são mais simétricas e menos falhadas. O adelgaçamento nos flancos das dobras indica dobramento durante a deposição (Dixon et al., 2005).

No Mar de Beaufort central, debaixo da ilha Richards e nas áreas próximas da costa, as dobras são cortadas por falhas lítricas normais (Dixon et al., 2005; Figura 4.3).

A Oeste do Delta do Rio Mackenzie encontram-se grandes estruturas incluindo o alto do Rio Blow e o *anticlinório* do Complexo de Herschel (Figura 4.3). Adjacente ao Complexo de Herschel, a Sul, encontra-se a Sub-Bacia de Demarcação (Figura 4.3), um *sinclínório* preenchido por estratos do Eocénico médio e mais recentes (Dixon et al., 2005).

4.1.2. Estratigrafia da Bacia do Mar de Beaufort

A estratigrafia da Bacia do Mar de Beaufort/Delta do Rio Mackenzie encontra-se dividida em quatro unidades tectono-estratigráficas principais, separadas por discordâncias regionais (Dixon et al., 1995; Dixon et al., 1994; Figura 4.4):

- Unidade Inuvikiana, do Proterozóico;
- Unidade Frankliniana, do Câmbrico até ao Devónico;
- Unidade Ellesmeriana, do Carbonífero (Mississipiano) até ao Cretácico inferior (Hauteriviano superior);
- Unidade Brookiana, do Cretácico inferior (Hauteriviano superior) até ao Holocénico (actualidade).

Unidade Inuvikiana

A unidade Inuvikiana (Figura 4.4), do Proterozóico, é constituída por rochas de baixo grau metamórfico, afectados por cavalgamentos e com 13 a 15 quilómetros de espessura (Dixon et al., 2005).

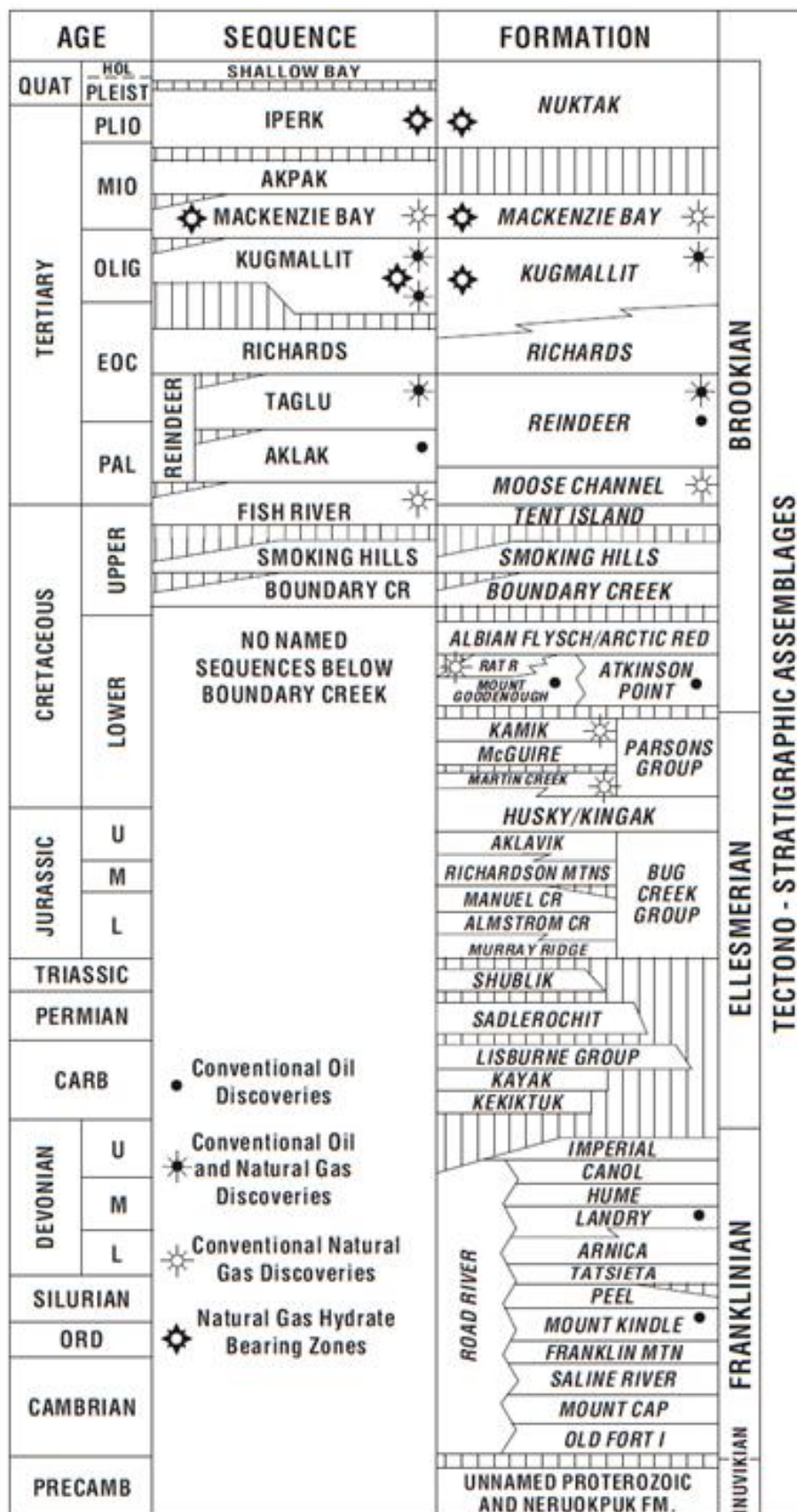


Figura 4.4 – Sequências estratigráficas no Mar de Beaufort e no Delta do Rio Mackenzie (Dixon et al., 2005).

Unidade Frankliniana

A unidade Frankliniana (Figura 4.4) (Câmbrico até ao Devónico) é formada por uma sucessão de carbonatos e argilitos, e em menor proporção por evaporitos e arenitos. Regista uma extensão crustal Paleozóica na margem passiva do paleo-Pacífico, anterior à orogenia Ellesmeriana, no Paleozóico tardio (Norris, 1997; Morrow, 1999).

Unidade Ellesmeriana

A unidade Ellesmeriana (Figura 4.4), do Carbonífero até ao Hauteriviano (Cretácico inferior), é composta por três sucessões: a sucessão estratigráfica do Carbonífero, a sucessão Pérmico-Triássico-Jurássico inferior e a sucessão do Jurássico superior-Cretácico inferior.

A sucessão estratigráfica do Carbonífero regista a história orogénica Ellesmeriana (Lane, 1998).

A sucessão do Pérmico, Triássico e Jurássico inferior, foi depositada no intervalo de tempo entre a Orogenia Ellesmeriana e a formação da Bacia do Canadá (Dixon et al., 2005).

A sucessão do Jurássico superior – Cretácico inferior, é constituída por cunhas clásticas progradantes para Noroeste que transitam a argilitos a Noroeste e a Oeste (Dixon et al., 2005). Estas registam a sedimentação inicial na Bacia Ártica do Canadá. De acordo com ConocoPhillips (2004), os primeiros depósitos nesta Bacia correspondem aos sedimentos da formação de Husky (argilitos grosseiros), do Jurássico superior (Figura 4.4). Esta sucessão é composta por quatro formações geológicas principais (Figura 4.4): Husky, Martin Creek, McGuire e Kamik. Segundo ConocoPhillips (2004), a litologia e o ambiente sedimentar destas formações é a seguinte:

- A Formação de Husky é composta por argilitos grosseiros.
- A Formação de Martin Creek é composta por siltes e areias de grão fino depositados num ambiente marinho a pouca profundidade. Algumas evidências indicam que surgiu uma linha de costa aproximadamente paralela à falha dos lagos Eskimo.
- A Formação de McGuire é composta por argilitos que foram depositados durante breve incursão marinha.
- A Formação de Kamik é composta por areias de delta e de costa, que se depositaram ao longo da margem Sudeste da Bacia. O provável levantamento para Sudoeste criou uma fonte de areias, inicialmente depositadas como depósitos de rios anastomosados. Grandes quantidades de areia fina e mais grosseira foram depositadas na área a Oeste da falha dos lagos Eskimo.

Unidade Brookiana

A unidade Brookiana (Figura 4.4), do Hauteriviano superior (Cretácico inferior) até ao Holocénico (actualidade), assenta em discordância sobre as sucessões mais antigas da margem da Bacia do Canadá (Lane, 1998; 1997; Dixon, 1995).

A sucessão do Cretácico superior até ao Holocénico, com cerca de 12 a 14 quilómetros de espessura (Dietrich et al., 1985), é composta por sequências deltaicas que possuem cerca de quatro quilómetros de espessura, cada uma. A sua litologia varia lateralmente em direcção à Bacia, passando de uma litologia mista entre arenitos e argilitos, para uma litologia composta apenas por argilitos. Na plataforma ocorrem intervalos isolados, ricos em arenitos (Dixon et al., 2005).

Uma subsidência costeira ou uma subida do nível do mar fez com que as areias da Formação Kamik (Figura 4.4), fossem cobertas por argilitos marinhos espessos provenientes do monte Goodenough e das Formações Arctic Red, entre 127 e 99 milhões de anos. O estiramento e a subsidência terminou no final do Cretácico superior, há cerca de 98 milhões de anos (ConocoPhillips, 2004).

As sequências Fish River e Aklak (Figura 4.4) foram depositadas na parte ocidental do Mar de Beaufort onde formam uma faixa larga rica em arenitos. Os depocentros do Eocénico ocorrem mais a Este (Dixon et al., 2005).

Os estratos Taglu (Figura 4.4) observam-se sob a Ilha Richards e na sua vizinhança, enquanto que os estratos Kugmallit (Figura 4.4) estão subjacentes à plataforma Beaufort central (Dixon et al., 2005). Uma descida significativa no nível relativo do mar, durante o final do Eocénico, expôs a plataforma, tendo-se formado canhões submarinos responsáveis pela deposição de um grande leque submarino na sequência Kugmallit basal. Esta sequência, na plataforma do Mar de Beaufort central, corresponde a uma sequência Oligocénica espessa e argilosa (Dixon et al., 2005).

A sequência Iperk do Plio-Pleistocénico é espessa, pouco deformada e sobrepõe-se discordantemente às unidades subjacentes (estratos do Paleo-Neogénico e mais antigos). O seu depocentro localiza-se na plataforma do Mar de Beaufort oriental (Dixon et al., 2005).

A deposição Holocénica ocorreu essencialmente no Mar de Beaufort central (Dixon et al., 2005).

4.1.3. Evolução Tectónica da Bacia Ártica do Canadá

Foram identificadas duas fases principais na história da tectónica regional da Bacia Ártica do Canadá, na zona em estudo. A primeira corresponde a uma fase extensional e a segunda a uma fase de compressão, com episódios extensionais intercalados. Na Figura 4.5 apresenta-se uma coluna crono-estratigráfica do Mar de Beaufort e do Delta do Mackenzie que mostra as principais fases tectónicas.

Desde, pelo menos, o Jurássico médio e durante uma parte do Cretácico inferior, ocorreu um período de rifting continental que culminou na formação da Bacia Oceânica Ártica ocidental (Embry e Dixon, 1990; Lane, 1997).

Durante o Albiano (Cretácico inferior) dá-se a alteração da deformação de um regime puramente extensional para um regime compressivo. Esta alteração provocou falhamento

e dobramento regionais, desde o Cretácico inferior até ao Neogénico (Lane e Dietrich, 1995; Lane, 1998), e que resultou na formação da faixa de dobramento do Delta do Mackenzie e do Mar de Beaufort. Durante este estágio, a deformação ocorreu intermitentemente, tendo sido evidenciados cinco pulsos de deformação principais (Figura 4.5).

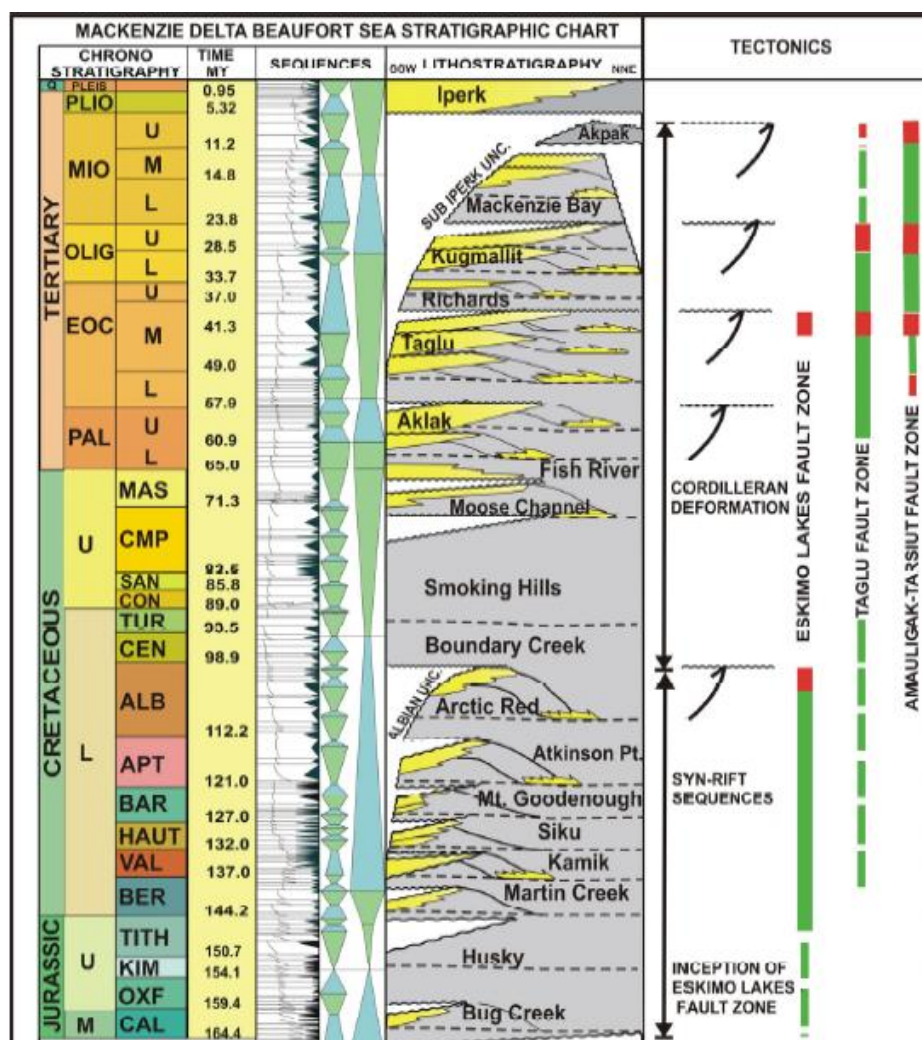


Figura 4.5 – Coluna estratigráfica do Delta do Mackenzie – Mar de Beaufort (ConocoPhillips, 2004), com os principais episódios tectónicos (a verde estão representados os episódios de extensão e a vermelho os de compressão/transpressão).

Fase extensional Mesozóica

Os episódios de rifting na região do Delta do Mackenzie e no Mar de Beaufort tiveram início no período Jurássico, há cerca de 208 a 187 milhões de anos atrás (ConocoPhillips, 2004). O estiramento ocorreu na direcção Sudeste-Noroeste, provocando a abertura da Bacia oceânica Ártica do Canadá, que é delimitada a Sudeste pela falha dos lagos Eskimo (ConocoPhillips, 2004). Os primeiros depósitos nesta Bacia correspondem a argilitos grosseiros da formação Husky (ConocoPhillips, 2004; Figura 4.5). A tendência das estruturas extensionais perto da margem da Bacia reflecte as

tendências estruturais do Proterozóico e do Paleozóico (Cook et al., 1987; Stephenson et al., 1994).

O rifting continental produziu enormes half-grabens e Bacias estreitas e alongadas, preservados na sub-superfície, nomeadamente em Kugmallit Trough e Blow Trough (Figura 4.6; Lane, 2002). As falhas delimitativas principais estão expostas localmente no *onshore* e encontram-se normalmente bem definidas nas linhas sísmicas (Lane, 2002).

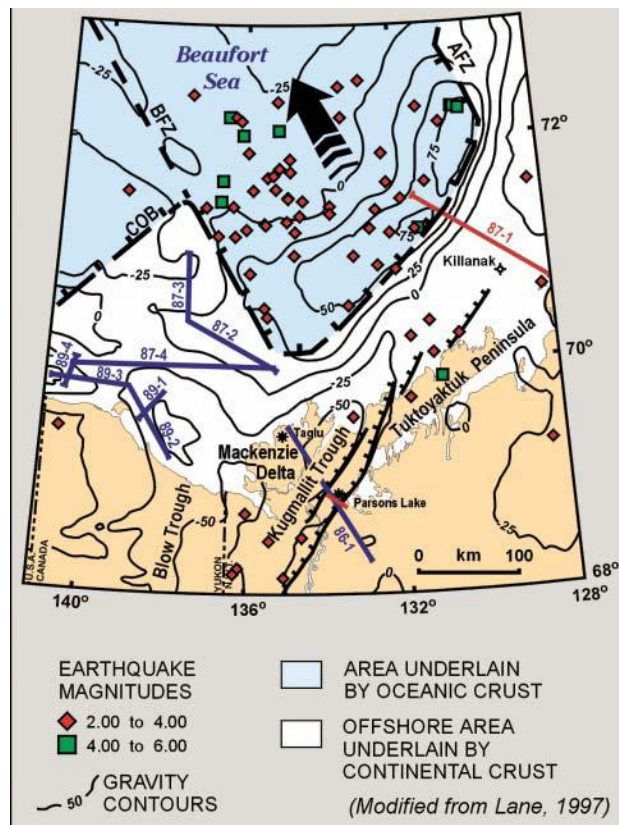


Figura 4.6 – Geometria da margem continental do Mar de Beaufort (Lane, 2002). Esta margem extensional foi produzida pelo rift cuja tendência extensional é para Noroeste (seta a preto). As linhas a vermelho e a azul correspondem a perfis sísmicos.

As falhas normais, activas desde pelo menos o Jurássico médio até o Cretácico médio, levaram à formação da margem continental Ártica (Embry e Dixon, 1990; Lane, 1997). As falhas normais tiveram um maior desenvolvimento sob o Delta do Mackenzie e a Península de Tuktoyaktuk (Lane, 2002). A fase extensional terminou com um incremento da fracturação e da sedimentação durante o Albiano (Lane, 1997).

Os dados de reflexão sísmica em Parsons Lake (Figura 4.7) mostram, na zona de falha dos lagos Eskimo (ELFZ), uma falha normal lítrica importante subjacente ao Delta do Mackenzie e à Península de Tuktoyaktuk (Figura 4.6; Lane, 2002). Esta zona marca o limite Sudeste da grande espessura de sedimentos da Bacia. A espessura preservada do Jurássico até à sucessão do Cretácico inferior é maior a Noroeste da falha dos lagos Eskimo do que do lado Sudeste, e observa-se no perfil sísmico a discordância que separa estas unidades do Cretácico superior (Lane, 2002). Acima da discordância, a reactivação do Paleogénico pouco afectou a sucessão mais recente (Lane, 2002).

A discordância do Albiano marca, ao longo da margem Ártica, o final da fase de rift (Lane, 2002).

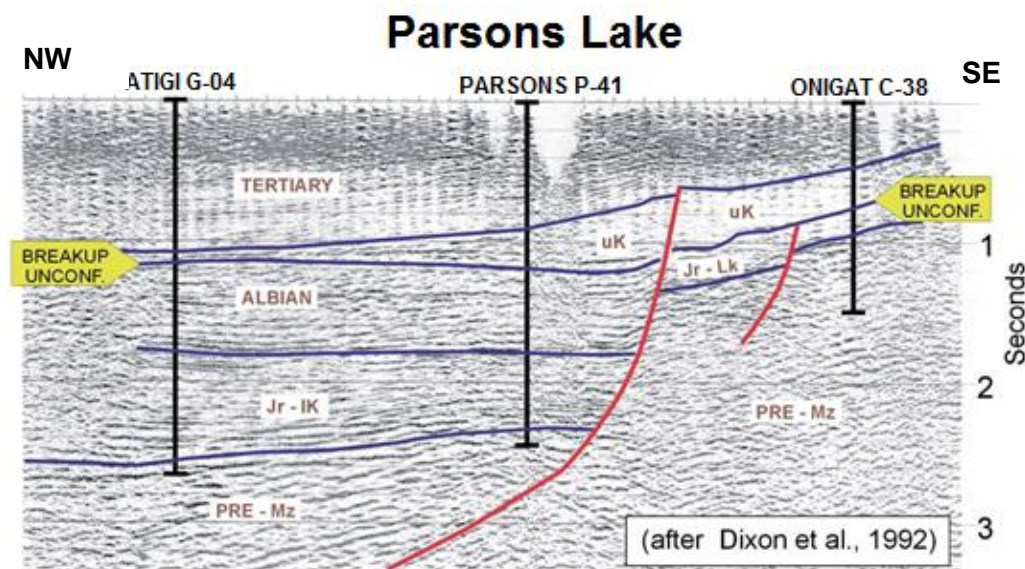


Figura 4.7 – Secção sísmica situada em Parksons Lake, onde se observa claramente a principal discordância do Albiano, na zona de falha dos lagos Eskimo (Lane, 2002). A localização da secção está indicada na Figura 4.6.

Fase orogénica do Cenozóico

Há cerca de 97 milhões de anos, no Cretácico superior, a extensão terminou, dando lugar à compressão na direcção Este-Nordeste, associada com a formação da Cordilheira do Alaska, que se sobrepôs à extensão anterior. As Bacias existentes na região começaram a sentir os efeitos do cavalgamento a Oeste (ConocoPhillips, 2004). Há cerca de 70 milhões de anos, o proto-Delta do Mackenzie começou a formar-se (ConocoPhillips, 2004).

Do Albiano até ao Miocénico tardio, foram documentadas cinco principais pulsações de deformação compressiva. As pulsações mais significativas ocorreram do Paleocénico até ao Miocénico médio e no Miocénico tardio (Lane, 2002). Dados no *offshore*, indicam que a deformação ocorreu de forma episódica (Lane e Dietrich, 1995). Na maioria dos casos, as fases múltiplas de contracção podem ser atribuídas às interacções entre as placas proto-Pacífica, Pacífica e Norte Americana (Seeley e Spratt, 2010).

Os eventos ocorridos entre o Paleocénico e o Miocénico médio produziram um grupo de estruturas *onshore* (na parte Noroeste do Yukon e no Alasca adjacente) e *offshore* (na Bacia da margem continental) que resultaram na formação da faixa de dobramento do Delta do Mackenzie e do Mar de Beaufort (Lane, 2002; Seeley e Spratt, 2010).

Estas estruturas não se desenvolveram exclusivamente devido à orogenia responsável pela formação da Cordilheira, estando também incluída uma importante componente de compressão Este-Oeste ocorrida, provavelmente, em resposta ao aumento da superfície do Atlântico Norte, no início do Paleocénico (Lane, 2002).

A pulsação do Miocénico tardio representa o evento de deformação final na maioria da região. As estruturas do Miocénico formam dobras lineares longas, concentradas na parte distal da Bacia do Beaufort-Mackenzie. Existem dobras e falhas secundárias relacionadas com as pulsações de deformação do Paleo-Neogénico, debaixo do Delta do Mackenzie, no Mar de Beaufort Central (Lane, 2002).

4.2. Localização e Descrição da Secção Sísmica

4.2.1. Localização da secção sísmica

A secção sísmica em estudo situa-se a Norte do Delta do Rio Mackenzie no *offshore* do Mar de Beaufort, apresentando uma orientação Noroeste-Sudeste (Figura 4.9).

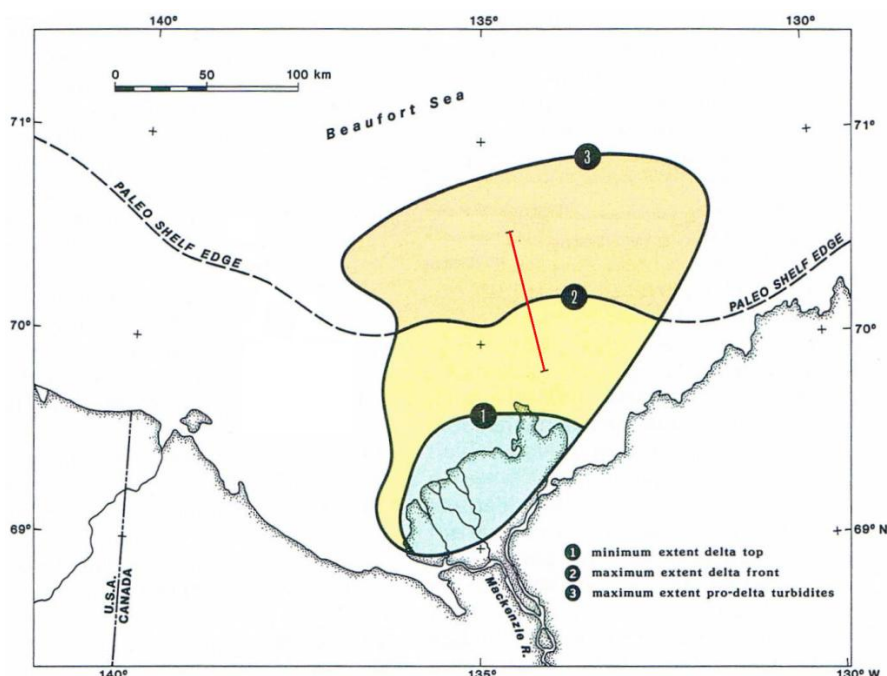


Figura 4.9 – Localização geográfica da linha sísmica em estudo (a vermelho; Hubbard et al., 1985).

Na secção sísmica (Figura 4.10), observa-se uma megasequência principal, denominada Eureka (Hubbard et al., 1985), e que é composta por quatro sequências principais (1, 2, 3 e 4). Sobrejacente a esta, existe uma série sedimentar mais recente, que foi denominada de pós-Eureka (Hubbard et al., 1985). A megasequência Eureka repousa num substrato, denominado de sequência pré-Eureka (Hubbard et al., 1985).

A megasequência principal foi denominada Eureka devido à sua acumulação sedimentar ter resultado de um maior aporte de sedimentos, em consequência do levantamento provocado pela deformação Eureka (Embry e Balkwill, 1992).

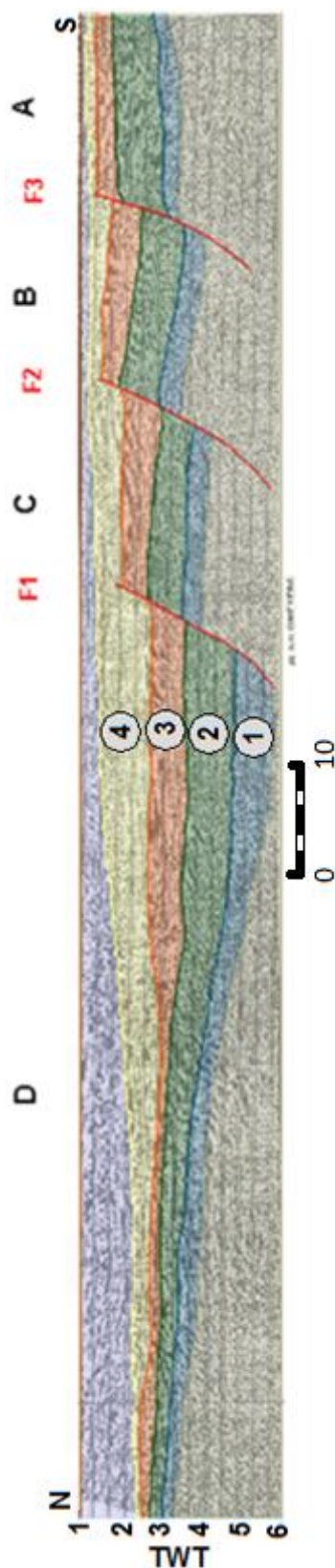


Figura 4.10 – Linha sísmica em estudo (Hubbard et al., 1985), com a identificação das sequências sísmo-estratigráficas principais. Também se encontram identificados os diferentes blocos e respectivas falhas que os delimitam. Os números 1, 2, 3 e 4, correspondem às unidades principais da megasequência Eureka.

Segundo Hubbard et al. (1985), a megasequência Eureka depositou-se numa fase pós-rift e representa a sedimentação clástica numa margem continental passiva, que chega a atingir espessuras de mais de 4 km. Esta megasequência é dominada por ambientes de deposição deltaica.

A deposição Eureka teve uma duração de cerca de 40 milhões de anos, desde o Eocénico médio até ao Miocénico médio. A deposição da sequência pré-Eureka ocorreu desde o Cretácico superior até ao Paleogénico superior e, por último, o enchimento da sequência pós-Eureka teve uma duração de 10 milhões de anos, tendo ocorrido desde o Miocénico tardio até à actualidade.

A espessura total dos sedimentos segue o padrão característico de uma margem continental passiva com espessura máxima no talude de 3 km, ocorrendo em forma de cunha (Hubbard et al., 1985).

O depocentro da secção sísmica em estudo encontra-se numa posição similar à do delta actual do Rio Mackenzie, indicando que a fonte de alimentação dos sedimentos tem permanecido relativamente estável desde o Eocénico. O espessamento do depocentro está associado com a movimentação das falhas, numa posição deltaica frontal. Na base do paleo-declive, elevações deposicionais sugerem que o fluxo gravitacional tenha sido uma importante forma de transporte de sedimentos durante o Eureka (Hubbard et al., 1985).

4.2.2. Descrição da secção

Na linha sísmica em estudo (Figura 4.10) verifica-se a existência de estruturas extensionais, podendo ser observadas seis sequências sismo-estratigráficas e quatro blocos rodados principais, delimitados por três falhas normais (Figura 4.10).

Sobre o substrato pré-Eureka observa-se a megasequência Eureka, composta por quatro sequências principais (1, 2, 3 e 4) sobre a qual repousa, em discordância angular, a sequência sedimentar pós-Eureka (Figura 4.10; Hubbard et al., 1985).

Na Figura 4.10 a sequência pré-Eureka está identificada a verde-claro e a sequência pós-Eureka, a azul acinzentado. As restantes sequências 1, 2, 3 e 4 estão representadas com as cores azul, verde, laranja e amarelo, respectivamente. Na Figura 4.10 também se podem observar, a vermelho, as três falhas principais, identificadas como F_1 , F_2 e F_3 , e os respectivos blocos de falha, por elas delimitadas, identificados como A, B, C e D.

4.2.3. Estratigrafia

Como já foi referido anteriormente, a megasequência Eureka encontra-se dividida em quatro sequências deposicionais principais: 1, 2, 3 e 4, cujas características estratigráficas, segundo Hubbard et al. (1985), se descrevem de seguida. Na Figura 4.11,

apresenta-se uma coluna crono-estratigráfica destas sequências, para o Mar de Beaufort, segundo Hubbard et al. (1985).

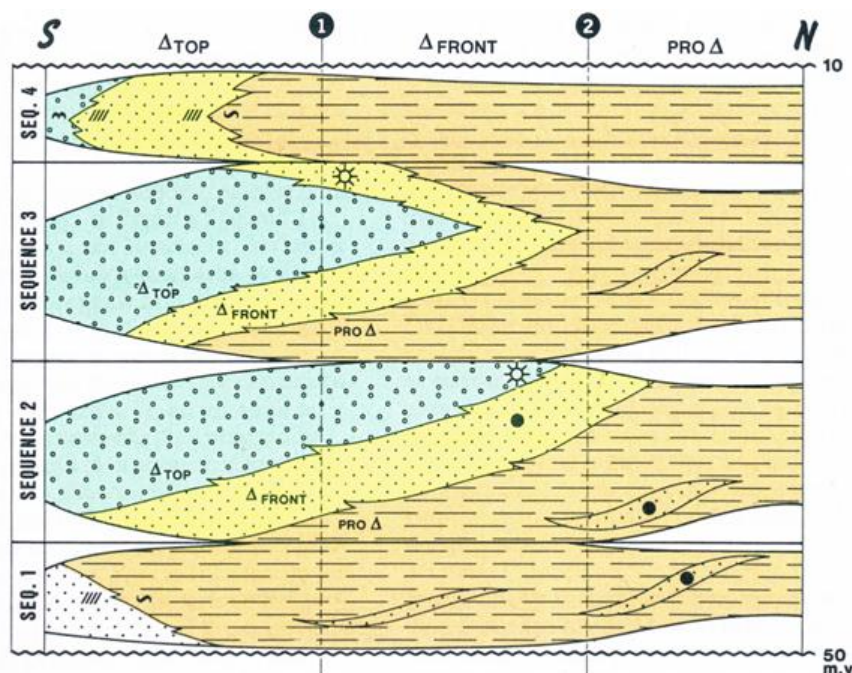


Figura 4.11 – Sequências sismo-estratigráficas principais da zona do Mar de Beaufort, segundo Hubbard et al. (1985), onde a cor azul representa as fácies do topo do Delta, a cor amarela as fácies da frente do delta e a cor laranja as fácies do pró-delta.

A sequência 1 é essencialmente argilosa e deposita-se sobre uma superfície irregular pré-Eurekana. Dados sísmicos e dados de poços mostram a existência de leques turbidíticos, compostos por areias finas, que progradam na Bacia até ao final da deposição da sequência 1.

A sequência 2 inclui argilitos pró-deltaicos. Estes são espessos e contêm camadas finas, geradoras de óleo e gás de qualidade moderada. As areias da frente do delta são extensas e estendem-se para o Norte na Bacia, onde se formaram leques turbidíticos. Esta sequência corresponde à maior progradação deltaica na região do Mar de Beaufort.

Segundo dados de poços, a sequência 3 é menos rica em areias do que a sequência 2 e prograda para além do anterior paleo-relevo, formando lobos deposicionais salientes, em águas profundas. São comuns as fácies turbidíticas pró-delta. Esta sequência foi depositada durante o Oligocénico tardio quando, devido à deformação Eurekana, ocorreu um maior fornecimento de sedimentos clásticos.

Por último, a sequência 4 representa uma diminuição no aporte de sedimentos, coincidindo com o final do Eurekano. A distribuição de fácies mostra geralmente um padrão transgressivo.

De seguida relacionam-se os dados crono-estratigráficos fornecidos por Hubbard et al. (1985) com a coluna crono-estratigráfica regional fornecida por ConocoPhillips (2004)

para o Delta do Mackenzie/Mar de Beaufort (Figura 4.12), de modo a identificar regionalmente as sequências 1, 2, 3 e 4, que compõem a megasequência Eureka.

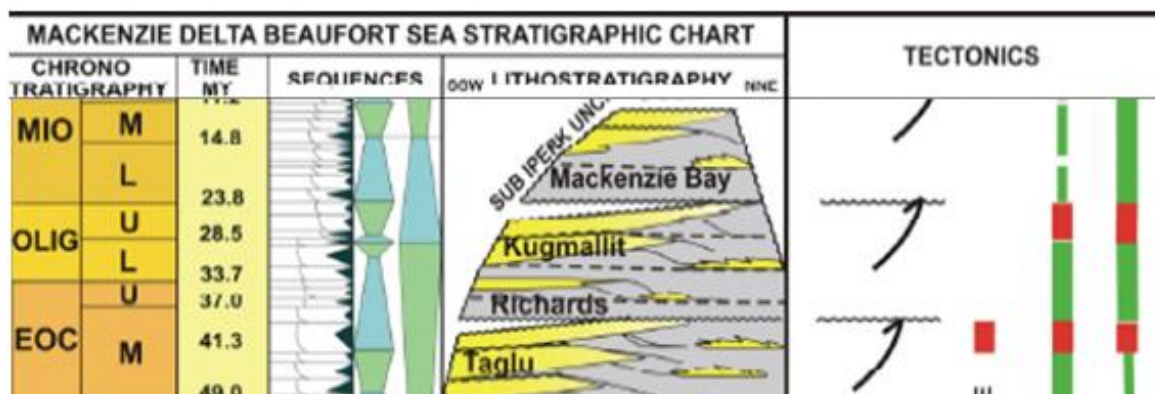


Figura 4.12 - Coluna crono-estratigráfica do Delta do Rio Mackenzie e do Mar de Beaufort, com informação relativa aos pulsos tectónicos principais (ConocoPhillips, 2004).

Sabendo que a deposição Eureka se deu do Eocénico médio até ao Miocénico médio (Hubbard et al., 1985) e analisando a coluna crono-estratigráfica regional para o Delta do Mackenzie/Mar de Beaufort (Figura 4.12), observa-se que durante este intervalo de tempo foram identificadas quatro sequências principais: Taglu, Richards, Kugmallit e Mackenzie Bay.

Sabe-se igualmente que a sequência 3 foi depositada durante o Oligocénico tardio (Hubbard et al., 1985) e que a sequência Kugmallit se depositou igualmente no Oligocénico (Dixon et al., 2005). Por outro lado, os padrões litológicos que compõem a megasequência Eureka também parecem coincidir com a estratigrafia apresentada pelas sequências Taglu, Richards, Kugmallit e Mackenzie Bay.

Assim, tendo em conta estes factos, pode-se concluir que as quatro sequências (1, 2, 3 e 4) que formam a megasequência denominada Eureka por Hubbard et al. (1985), muito provavelmente correspondem às sequências Taglu, Richards, Kugmallit e Mackenzie Bay, respectivamente (Figura 4.12).

4.3. Interpretação da Secção Sísmica

Antes da *restauração* da secção sísmica utilizando o programa 2DMove, efectuou-se uma análise detalhada desta secção, de forma a reconstituir os principais eventos tectono-sedimentares.

4.3.1. Deposição da sequência 1

Na linha sísmica (Figura 4.10) observa-se que a sequência 1 mantém sensivelmente a sua espessura nos blocos A, B e C pelo que se pode admitir que possivelmente, durante

a sua sedimentação o substrato seria contínuo e as falhas normais F_2 e F_3 não se encontravam em actividade.

Em contraste, no bloco D, a espessura da sequência 1 não é constante, verificando-se que aumenta progressivamente no sentido da falha F_1 . Tal facto sugere que esta falha esteve em funcionamento durante a deposição desta sequência. Com efeito, a análise detalhada da secção sísmica no bloco D mostra que os reflectores são paralelos e concordantes com os do substrato pré-eurekano nas zonas mais afastadas da falha, tornando-se divergentes nas proximidades do acidente tectónico (Figura 4.13).

Deste modo, parecem ter ocorrido dois tempos tectonicamente diferentes durante a sedimentação da sequência 1: um primeiro tempo (t_{1a}) onde a sedimentação ocorreu anteriormente à movimentação da falha F_1 e um segundo tempo (t_{1b}) onde a falha F_1 terá estado activa simultaneamente com a deposição da parte superior da sequência 1.

Em síntese, a sequência 1 é anterior às falhas situadas na parte Sul da secção (F_2 e F_3) e apresenta relações pré- e sin-tectónicas relativamente à falha F_1 .

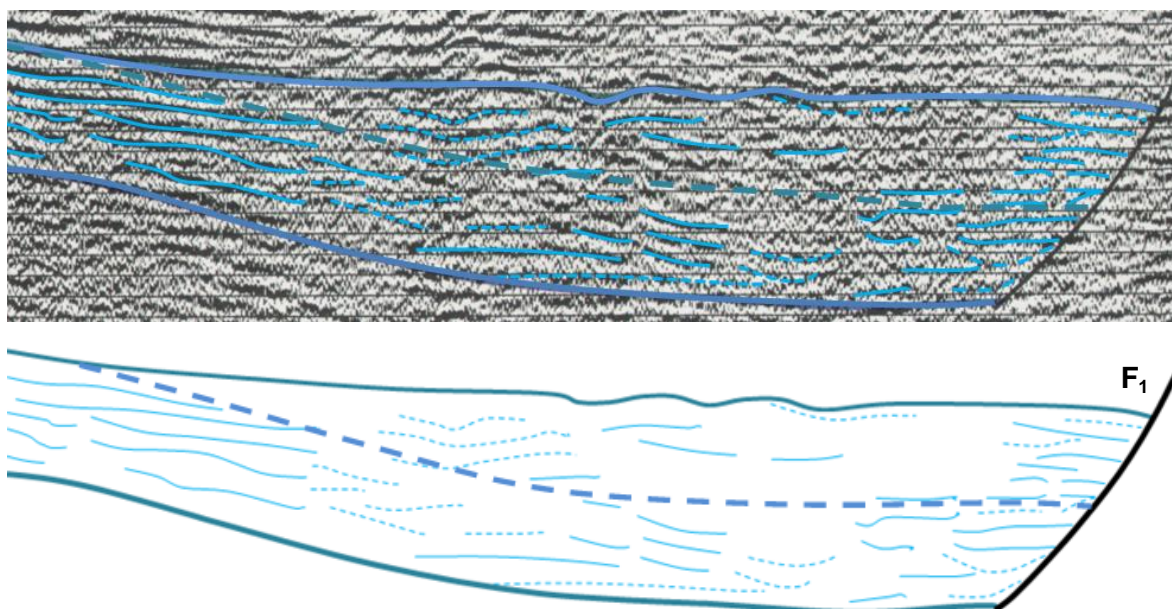


Figura 4.13- Interpretação de alguns reflectores da sequência 1 referentes ao bloco D, na interface da falha F_1 .

A Figura 4.14 mostra esquematicamente os tempos durante a deposição da sequência 1 assim como as suas relações temporais com os acidentes tectónicos.

No primeiro tempo, t_{1a} , terá ocorrido a deposição de parte da sequência (1a) com espessura mais ou menos uniforme ao longo de toda a secção (Figura 4.14b).

Depois, no tempo t_{1b} , a actividade da falha F_1 provocou o abatimento progressivo do bloco D, permitindo assim uma maior acumulação de sedimentos nas proximidades da falha.

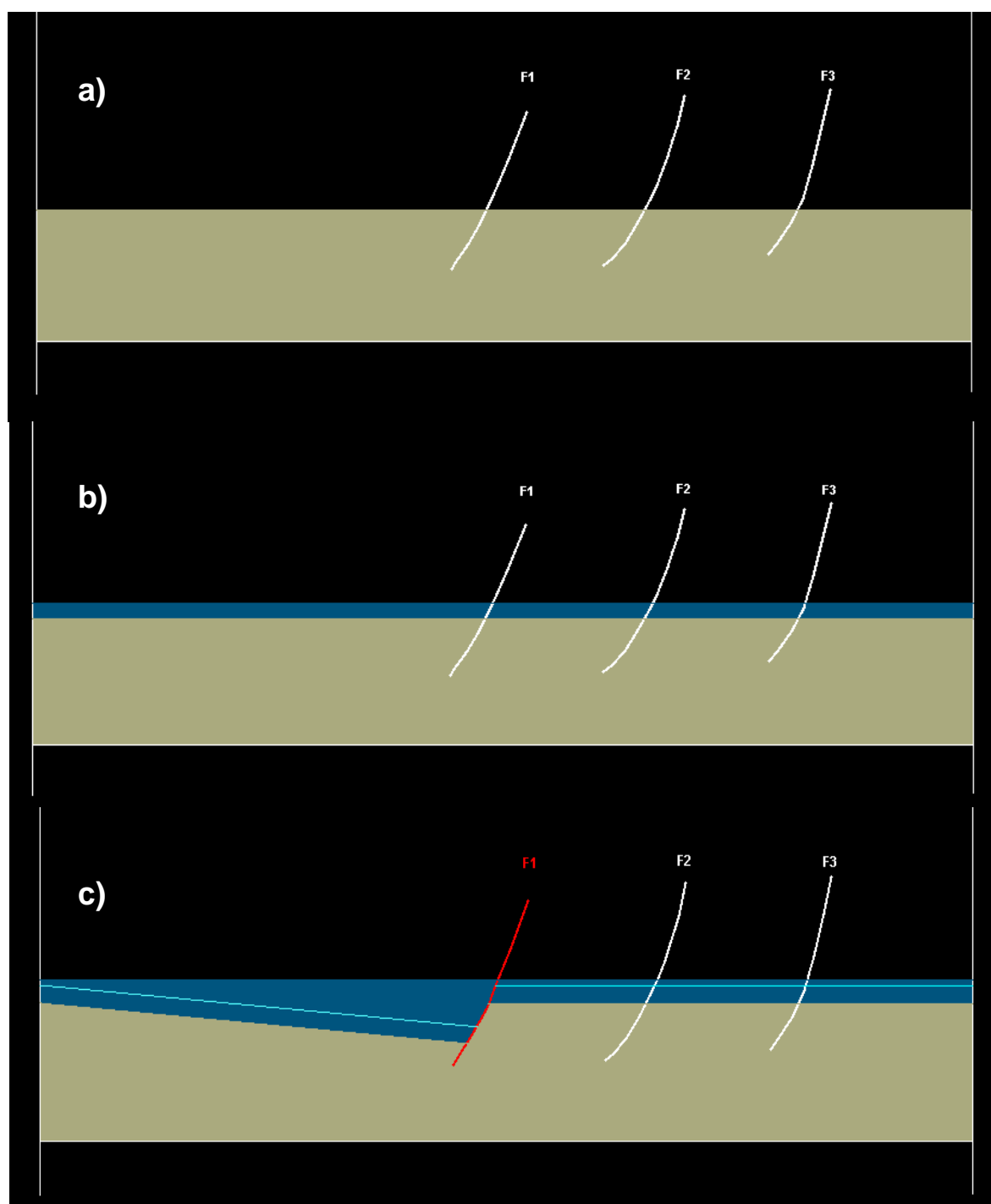


Figura 4.14 - Esquema geral da deposição da sequência 1 (a azul): a) Tempo t0: esquema do substrato pré-Eurekano (verde-claro); b) tempo t1a: deposição de parte da sequência. As três falhas estão inactivas; c) Tempo t1b: continuação da sedimentação da sequência. A falha F_1 encontra-se activa e as falhas F_2 e F_3 permanecem inactivas.

4.3.2. Deposição da sequência 2

Observando a sequência 2 na linha sísmica (Figura 4.10), verifica-se que esta sequência mantém também sensivelmente a sua espessura nos blocos A, B e C, pelo que se pode concluir que não ocorreu movimentação das falhas F_2 e F_3 durante a sua deposição. Por outro lado, no bloco D (Figura 4.10), a sequência espessa junto à falha F_1 , o que sugere que esta se manteve em funcionamento durante a sua deposição.

Relativamente ao bloco D, a espessura da sequência vai diminuindo para Norte. Além disso, quando se observam os reflectores no bloco D, verifica-se que estes são paralelos e concordantes com a base da sequência, num ponto mais afastado da falha e que vão divergindo, à medida que se aproximam desta (Figura 4.15).

Este facto indica a possibilidade de terem ocorrido dois tempos distintos, durante a sedimentação da sequência 2: um primeiro tempo (t_{2a}) sem movimentação de qualquer falha, onde apenas ocorreu deposição da sequência (2a); e um segundo tempo (t_{2b}), onde a falha F_1 entrou em actividade simultaneamente com a deposição da sequência (2b).

Pode-se então concluir que a sedimentação da sequência 2 ocorreu pré- e sin-tectonicamente com o segundo período de movimentação da falha F_1 . De notar que a geometria da sequência 2b sugere a existência de um bordo de plataforma continental (Figura 4.15).

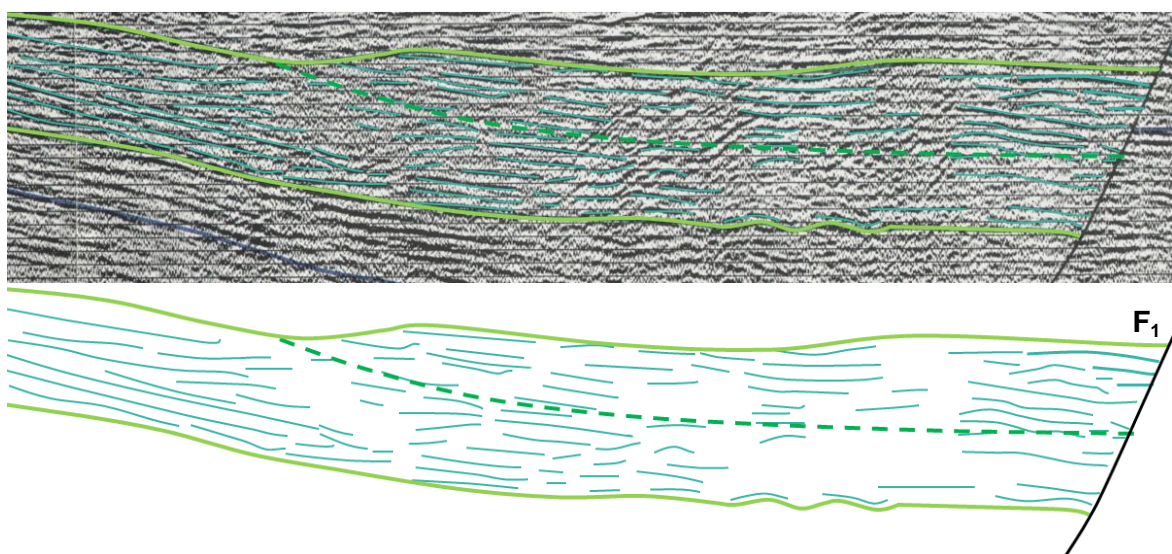


Figura 4.15 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 2, no bloco D.

A Figura 4.16 mostra esquematicamente os diferentes tempos durante a deposição da sequência 2, assim como a sua relação temporal com a movimentação das falhas. No primeiro tempo (t_{2a}), verifica-se que terá ocorrido a deposição de parte da sequência (2a), sem qualquer movimentação das falhas, mantendo a espessura aproximadamente uniforme ao longo de toda a secção. Por último, no segundo tempo (t_{2b}) a falha F_1 entra em actividade, provocando o abatimento progressivo do bloco D, gerando assim uma maior acomodação de sedimentos na proximidade da falha F_1 .

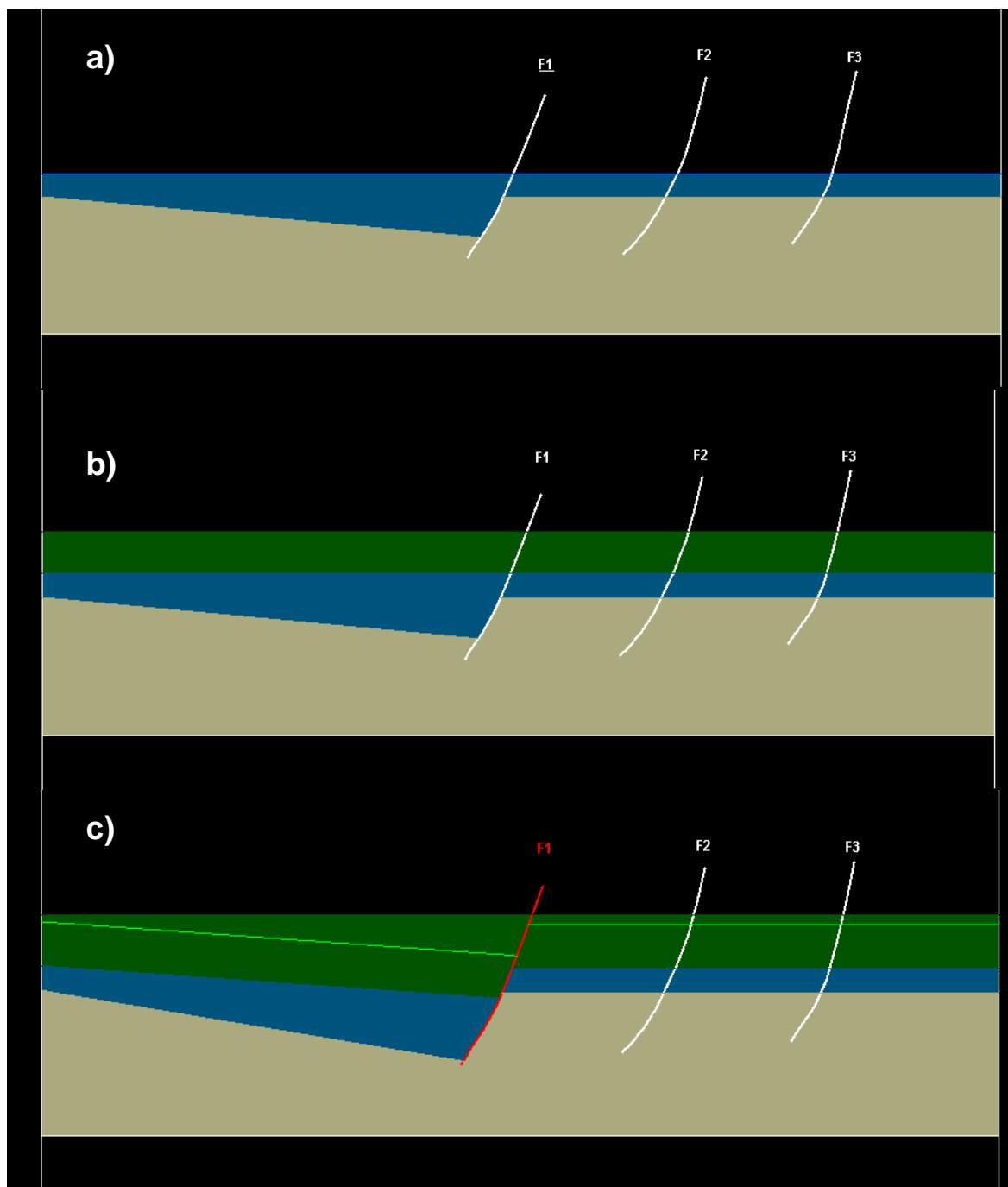


Figura 4.16 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 2 (a verde): a) tempo t1b, anteriormente à sua deposição, mostrando apenas a sequência 1; b) tempo t2a, mostrando a sedimentação de parte superior da sequência 2a; c) tempo t2b, mostrando a movimentação progressiva da falha e a sedimentação da parte mais recente da sequência 2.

4.3.3. Deposição da sequência 3

Do perfil sísmico representado na Figura 4.10 e analisando a sequência 3 é de notar significativas diferenças na sua espessura ao longo de toda a secção (nos diferentes blocos A, B, C e D), principalmente na proximidade das falhas F₁ e F₂. Isto implica que,

durante a sedimentação da sequência 3, as três falhas F_1 , F_2 e F_3 estiveram activas. A diferença da espessura entre os blocos A e B, é muito pouco significativa, o que implica que a falha F_3 pouco se moveu ao longo deste tempo.

Analisando a posição dos reflectores no bloco B (Figura 4.17), verifica-se que na base da sequência estes se apresentam divergentes, enquanto que no topo aparecem paralelos ao topo da sequência 3. Assim, pode-se inferir que a falha F_3 tenha permanecido activa contemporaneamente à deposição, apenas num tempo inicial e que, posteriormente, tenha permanecido inactiva.

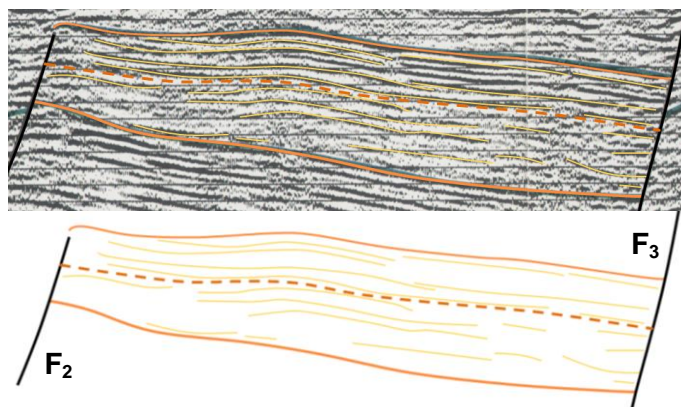


Figura 4.17 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco B.

No bloco C, tendo em conta a posição dos reflectores (Figura 4.18) que se mantêm divergentes ao longo de toda a sua espessura e o facto da sequência, neste bloco, espessar claramente para Sul, em direcção à falha F_2 , pressupõe-se que a deposição se tenha dado sin-tectonicamente com a movimentação nesta falha.

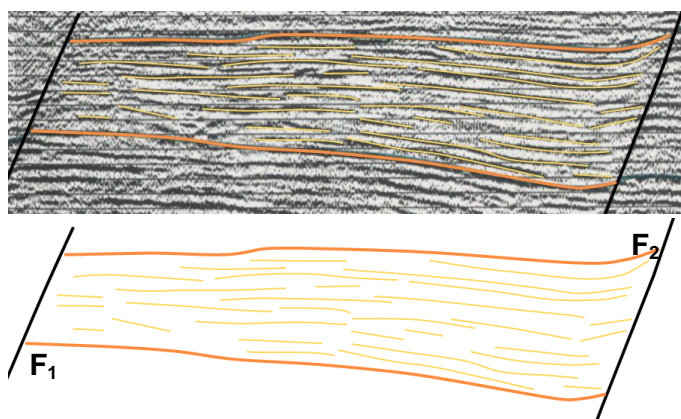


Figura 4.18 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco C.

No bloco D, de uma forma semelhante ao que acontece com o bloco C, os reflectores (Figura 4.19) são divergentes e observa-se um pequeno espessamento lateral da sequência em direcção à falha F_1 . Assim, parece que a deposição se deu igualmente em simultâneo com a movimentação da falha F_1 . Neste bloco observa-se uma importante progradação, em direcção ao que poderia ser o bordo da plataforma, a Norte.

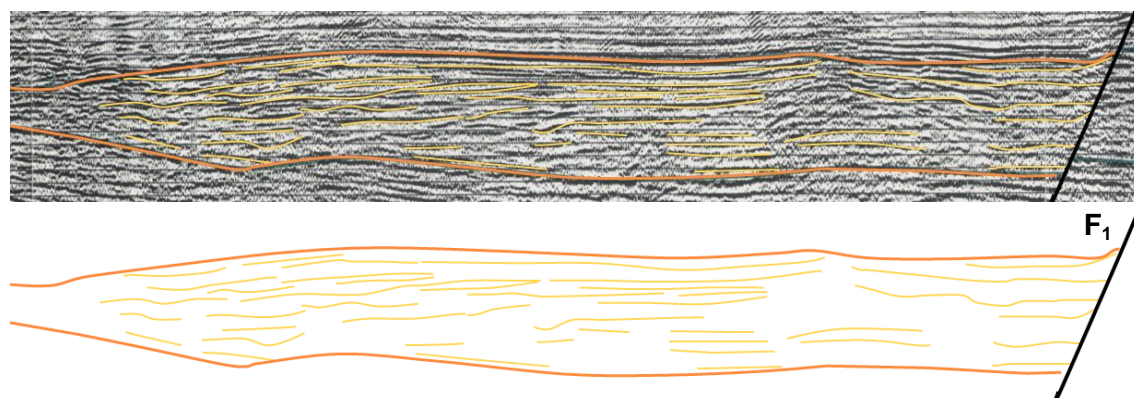


Figura 4.19 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco D.

Pode-se deste modo concluir, que a deposição de toda a sequência 3 é sin-tectónica com a movimentação das falhas F_1 , F_2 e F_3 , e que as duas últimas falhas se formaram neste tempo. Na Figura 4.20, apresenta-se um esquema da deposição da sequência 3.

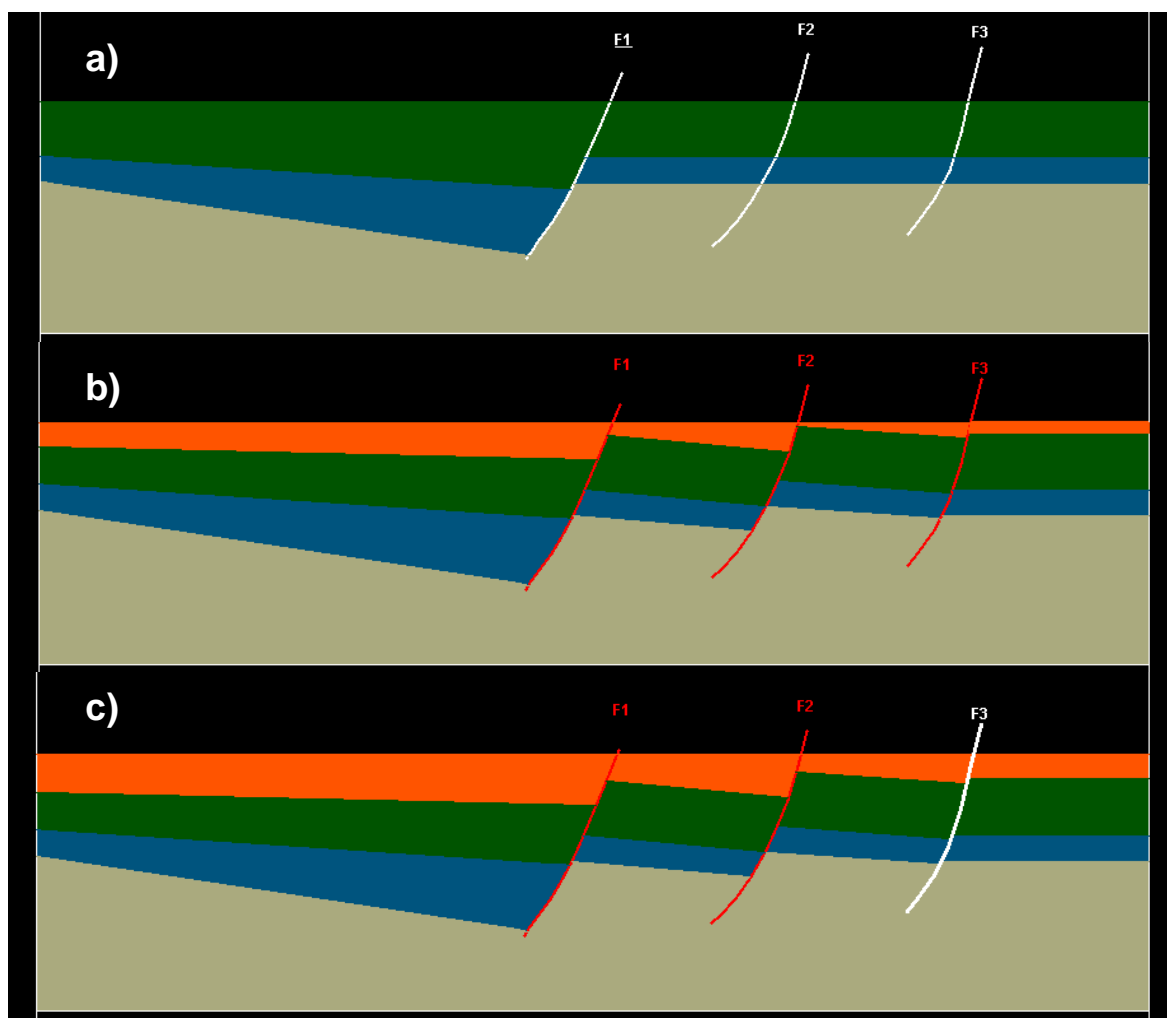


Figura 4.20 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 3 (a laranja): a) antes da deposição desta sequência; b) no qual ocorreu deposição da sequência 3 e a movimentação das falhas; c) na continuação da deposição da sequência 3, após a falha F_3 ter cessado a sua actividade.

4.3.4. Deposição da sequência 4

Tendo em conta o perfil sísmico da Figura 4.10, pode-se verificar que as espessuras da sequência 4 nos blocos A, B, C e D variam significativamente, o que implica o controlo tectónico da sua sedimentação pelas três falhas, F_1 , F_2 e F_3 .

Observando agora pormenorizadamente os reflectores desta sequência nos blocos B e C, (Figura 4.21 e Figura 4.22, respectivamente) pode-se observar que se encontram de modo geral, sensivelmente horizontais. Este facto, conjugado com as variações de espessuras observadas sugerem que ocorreu movimentação nas falhas F_2 e F_3 , anteriormente à deposição da sequência 4, tendo depois interrompido a sua actividade.

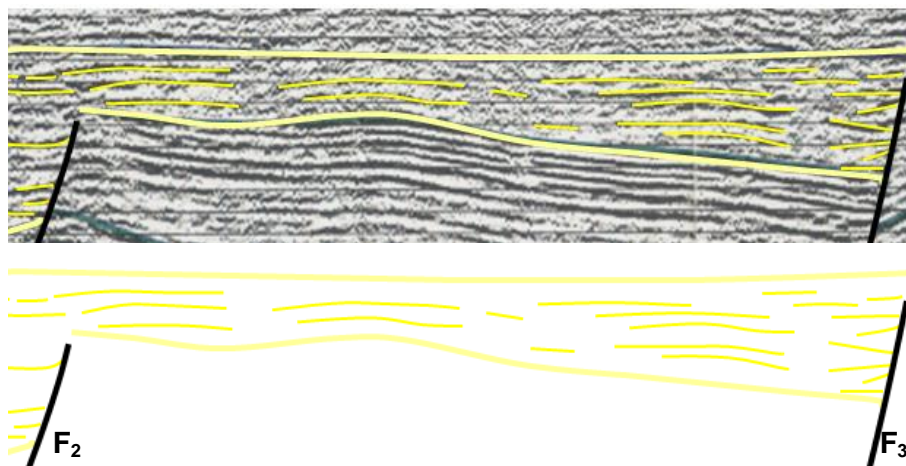


Figura 4.21 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco B.



Figura 4.22 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 3, no bloco C.

Relativamente ao bloco D, ao serem analisados os reflectores da sequência junto à falha F_1 (Figura 4.23), pode-se verificar uma ligeira divergência apenas na base da sequência. Assim, parece ter ocorrido uma movimentação da falha F_1 anteriormente à sedimentação da sequência, e um ligeiro movimento desta falha num tempo inicial da deposição da sequência 4, que foi logo interrompido.

Pode-se assim concluir que a falha F_1 funcionou antes e durante a sedimentação da base da sequência 4. As falhas F_2 e F_3 são anteriores à deposição. As três falhas cessaram então completamente a sua actividade, tendo continuado a deposição da sequência 4.

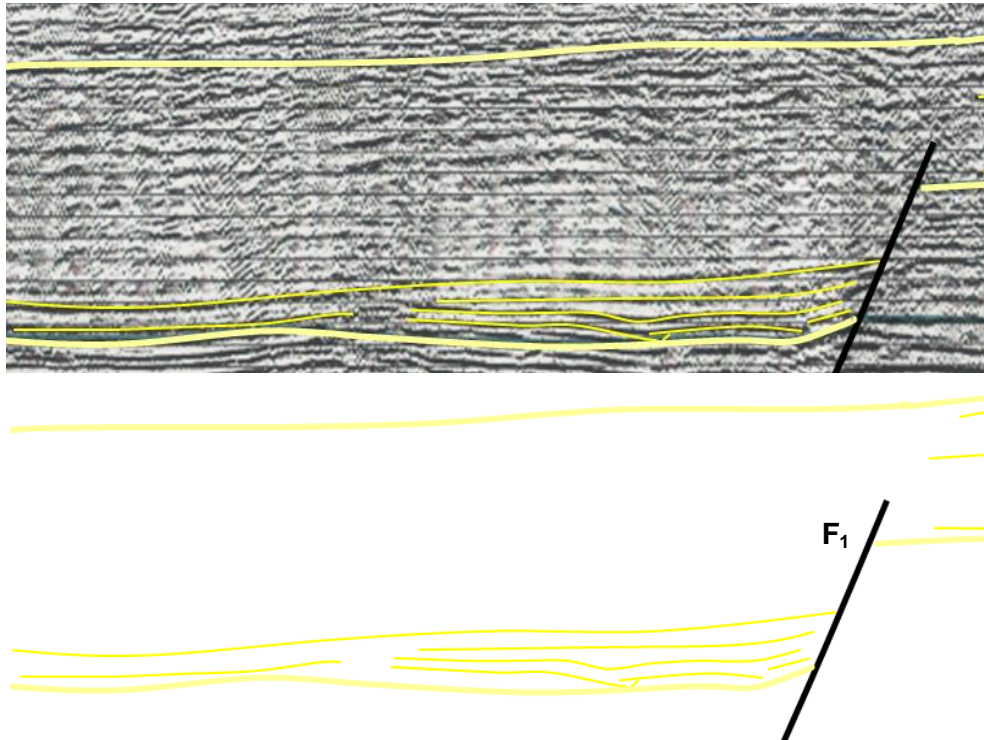


Figura 4.23 – Interpretação de reflectores referentes à sequência 4, na base do bloco D.

Na Figura 4.24 apresenta-se um esquema que ilustra a deposição da sequência 4. Esta deposição pode ser dividida em dois tempos distintos: um tempo $t4a$, no qual ocorreu movimentação das falhas F_1 , F_2 e F_3 , anteriormente à deposição da sequência Figura 4.24b; um tempo $t4b$, durante o qual ocorreu a deposição da base da sequência e alguma movimentação da falha F_1 (Figura 4.24c); e um tempo $t4c$, a partir do qual continuou a deposição desta sequência, mesmo após ter cessado a actividade da falha (Figura 4.24c).

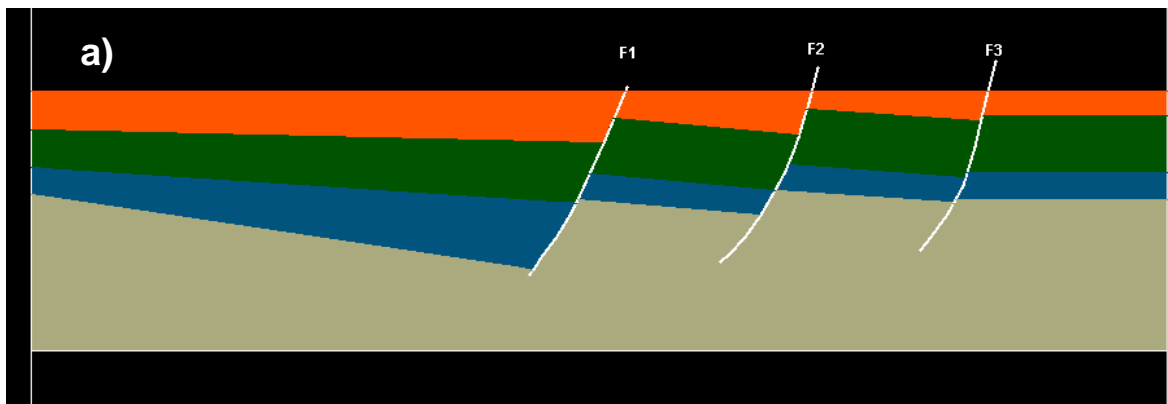


Figura 4.24 – Esquema ilustrativo da deposição da sequência 4 (a amarelo); a) tempo $t3$: anterior à movimentação das falhas e à deposição da sequência 4.

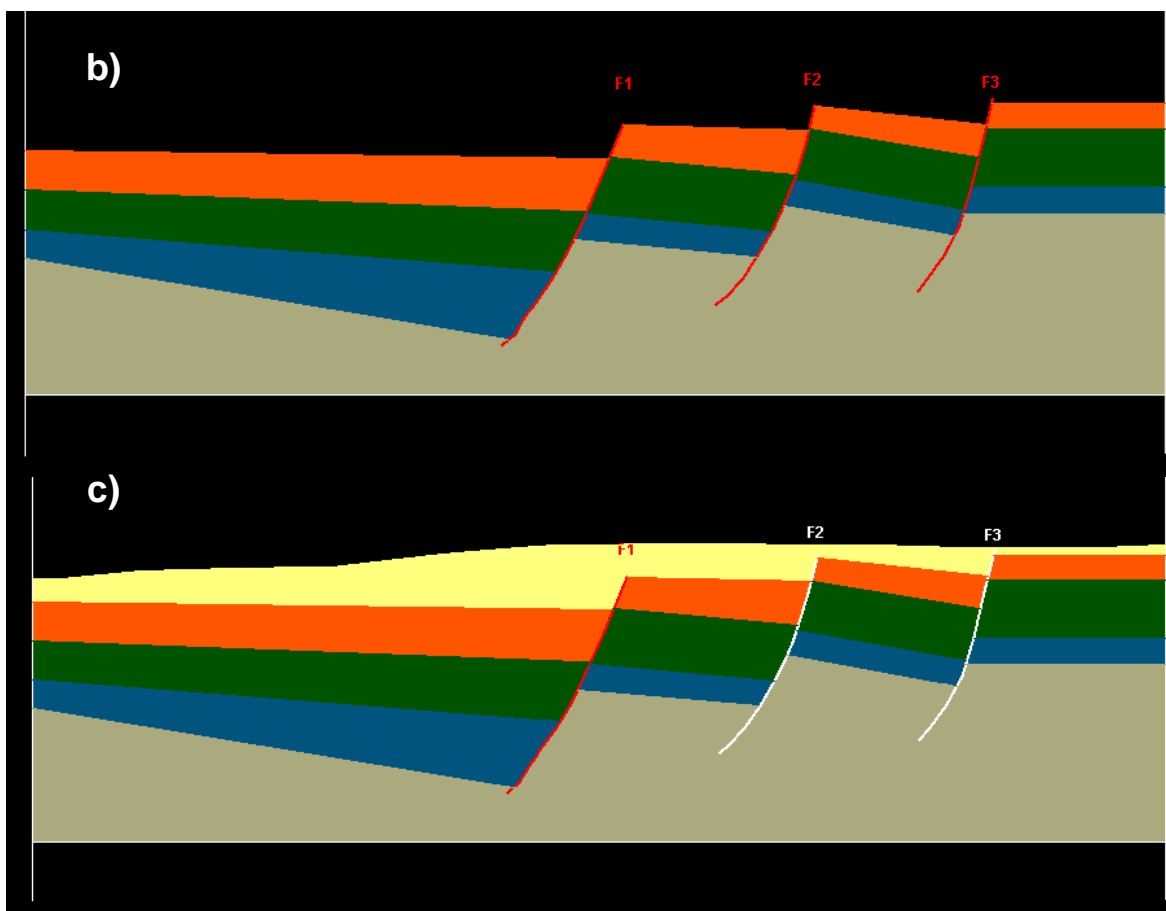


Figura 4.24 (cont.) – b) tempo t4a, durante o qual ocorreu a movimentação das falhas F_1 , F_2 e F_3 ; c) tempos t4b e t4c, durante o qual decorreu a deposição da sequência 4, tendo havido apenas uma pequena movimentação na falha F_1 , durante o início da deposição da sequência 4.

4.4. Preparação da secção sísmica no 2DMove

Após a análise prévia detalhada da secção sísmica, pretende-se agora efectuar a *restauração* desta secção sísmica (Figura 4.10) utilizando as ferramentas do programa 2DMove. Tal como foi referido no capítulo 3, antes de ser iniciada a *restauração* da secção é necessário efectuar alguns passos preliminares.

Em primeiro lugar, efectuou-se a digitalização do mapa e da secção sísmica em estudo, de modo a ser possível a sua preparação no 2DMove, que envolve:

- Introdução do mapa no programa;
- Associação da secção sísmica ao mapa;
- Construção da secção;
- Construção de uma base de dados adequada;
- Conversão da secção para profundidade.

4.4.1. Introdução do mapa no 2DMove

Tal como foi efectuado na Secção 3.3 desta dissertação, inseriu-se a imagem do mapa no 2DMove, sem o devido dimensionamento. Para o dimensionamento da imagem, foi necessário medir a escala gráfica do mapa. Esta mede, à escala por defeito do programa 2064.26 m, que corresponde a 100 km na realidade.

Seguidamente mediu-se o comprimento e a largura total da imagem, obtendo-se os valores de 10000.55 m e 7588.83 m, respectivamente. Tendo em conta que 100 km no mapa correspondem a 2064.26 m no terreno, o comprimento e a largura reais da imagem correspondem a 484461.74 m e 367629.56 m, respectivamente.

Para a referência do mapa no programa, alteraram-se as suas coordenadas nos dados do ficheiro. Assim, para a extremidade inferior esquerda, inseriram-se as coordenadas (0, 0) e para o topo superior direito, as coordenadas (484461.74, 367629.56). A imagem do mapa encontra-se agora devidamente referenciada e dimensionada (Figura 4.25).

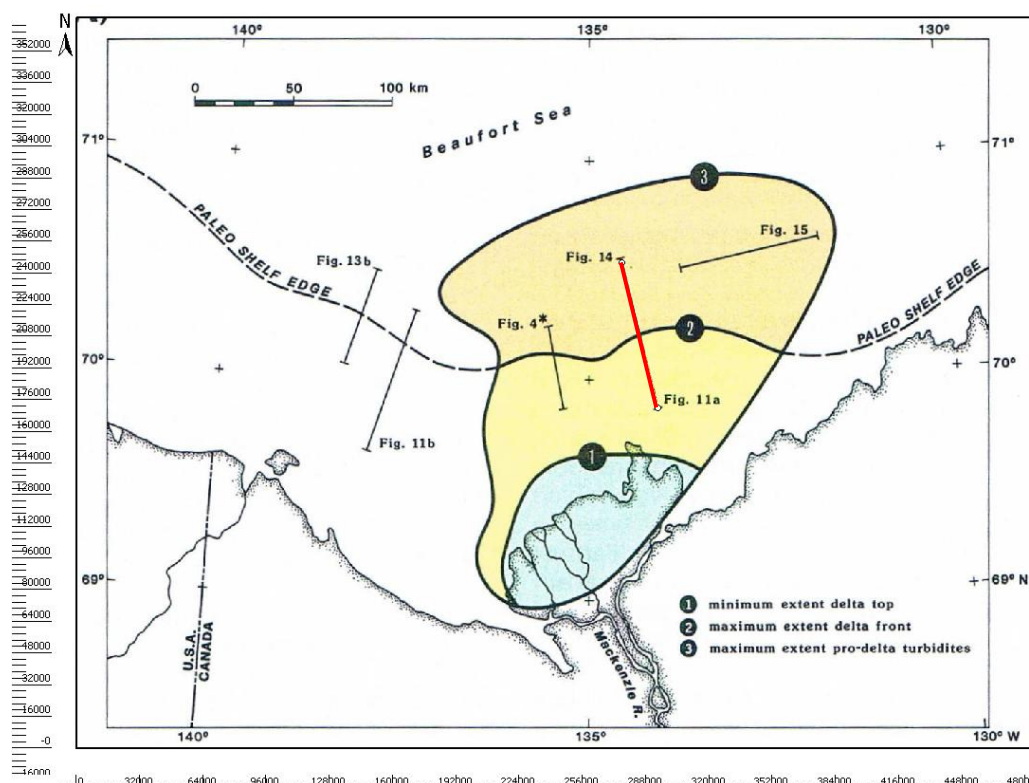


Figura 4.25 – Mapa inserido no programa e devidamente dimensionado, com o traço de secção (correspondente à secção sísmica em estudo), desenhado a vermelho.

4.4.2. Associação da secção sísmica ao mapa

Associou-se a secção sísmica ao mapa, tal como se descreveu na Secção 3.3 desta dissertação. Assim, alteraram-se os valores (por defeito) do programa para tempo, nos dados do ficheiro, e anotaram-se as coordenadas “x” e “y” dos dois extremos da linha da

secção sísmica. Seguidamente, inseriu-se a secção sísmica e redimensionou-se verticalmente a imagem da secção, utilizando o mesmo método usado nos exemplos do capítulo 3. De modo a visualizar-se uma melhor imagem da secção sísmica, duplicou-se a sua escala vertical (Figura 4.26).

4.4.3. Construção da secção

Como a secção já se encontrava interpretada, então apenas se realizou a sua construção. A construção de uma secção, tal como já foi referido anteriormente nos exemplos estudados no capítulo 3, envolve:

- 6) Delimitar a secção sísmica;
- 7) Desenhar na imagem a interpretação;
- 8) Atribuir propriedades às linhas desenhadas;
- 9) Estender e terminar as linhas;
- 10) Redimensionar os nós de cada linha;
- 11) Criar polígonos fechados.
- 12) Redimensionar a imagem

Em primeiro lugar, delimitou-se a secção, construindo dois “postes” verticais em ambos os extremos da secção e duas linhas horizontais, uma a definir o topo e outra a base da secção. Em todas as figuras que se seguem, a seta no canto superior direito indica o sul da secção.

No passo seguinte desenhou-se a interpretação do perfil sísmico, utilizando diferentes cores (azul-acinzentado, amarelo, laranja, verde, azul e verde-claro) para representar os horizontes que delimitam as sequências existentes e utilizando a cor vermelha para representar as falhas (Figura 4.26).

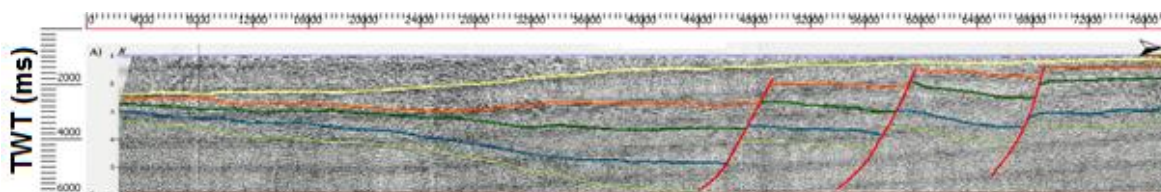


Figura 4.26 – Secção em tempo, com a respectiva interpretação inserida. A seta indica o sul.

Seguidamente, atribuíram-se as respectivas propriedades às linhas criadas. Estas propriedades serão úteis posteriormente, aquando da criação da base de dados. Definiram-se as três falhas existentes como “falhas” e identificaram-se os horizontes desenhados, de acordo com a sua cor. Deste modo a linha de cor azul-acinzentada corresponde ao topo da sequência pós-Eurekana, a de cor amarela ao topo da sequência 4, as linhas cor laranja correspondem ao topo da sequência 3, as de cor verde ao topo da sequência 2, as de cor azul ao topo da sequência 1 e, por último, as linhas de cor verde-claro correspondem ao topo da sequência pré-Eurekana. Também se atribuíram nomes a cada uma das linhas que delimitam as sequências. Esta operação não é essencial, no

entanto será útil posteriormente, na selecção dos objectos durante as diferentes fases de *restauração*.

De modo a delimitar áreas da secção nas quais depois serão criadas os polígonos, estenderam-se e terminaram-se todas as linhas desenhadas, utilizando uma percentagem de extensão de 5%. Ambas as extremidades das linhas ficaram estendidas até à linha de intersecção mais próxima (postes ou falhas).

Após se estender e terminar as linhas, é fundamental redimensionar os nós de cada linha uniformemente, em intervalos de 200 metros. Esta operação, para além de aumentar a resolução da linha, ajuda a evitar anomalias nos nós, que causariam problemas durante a *restauração*. Essas anomalias poderão ter sido geradas acidentalmente, durante a construção das linhas.

Por último, criaram-se os polígonos (Figura 4.27). Estes representam as unidades sismo-estratigráficas em cada bloco de falha e serão usados para definir as diferentes áreas da imagem. Deste modo será possível movimentar os diferentes blocos durante a *restauração*. Tal como foi referido anteriormente no capítulo 3, os polígonos podem ser criados de forma manual ou automática.

Como a secção sísmica à esquerda não terminava no mesmo local da linha de secção (a vermelho, Figura 4.26) redimensionou-se toda a secção (Figura 4.27) de modo a ficar de acordo com os dados originais.

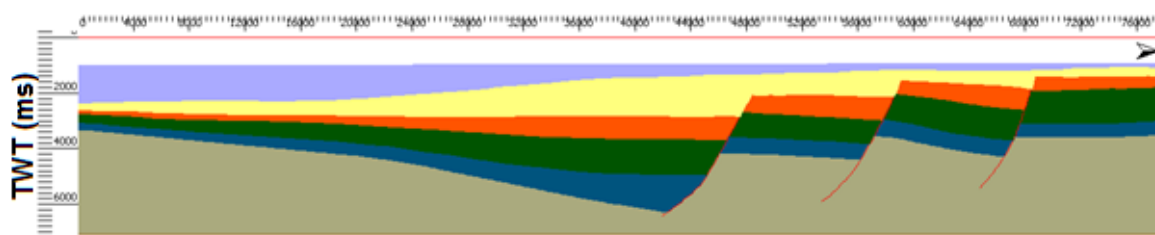


Figura 4.27 – Secção sísmica construída (em tempo).

Após estes passos, a secção sísmica em estudo encontra-se correctamente construída e pronta para ser manipulada (Figura 4.27). No entanto, antes de ser iniciado o processo de *restauração* foi ainda necessário criar uma base de dados e realizar a conversão da secção sísmica para profundidade.

4.4.4. Construção de uma base de dados adequada

Depois de se atribuírem as propriedades para cada um dos horizontes e de ser construída a secção sísmica, a melhor maneira de se construir uma base de dados é inserir um *pin* na vertical que atravessasse toda a secção, de modo a intersectar todas as sequências existentes. Assim, inseriu-se o *pin* do topo até à base da secção, no local onde a maioria das sequências são mais espessas (Figura 4.28), criou-se a base de dados, utilizando a informação já definida e, após estas operações, apagou-se o *pin*.

Como se prevê a realização da conversão em profundidade e de descompactações durante a *restauração* da secção sísmica, foi necessário incluir na base de dados, os parâmetros necessários aos cálculos que se pretendem efectuar.

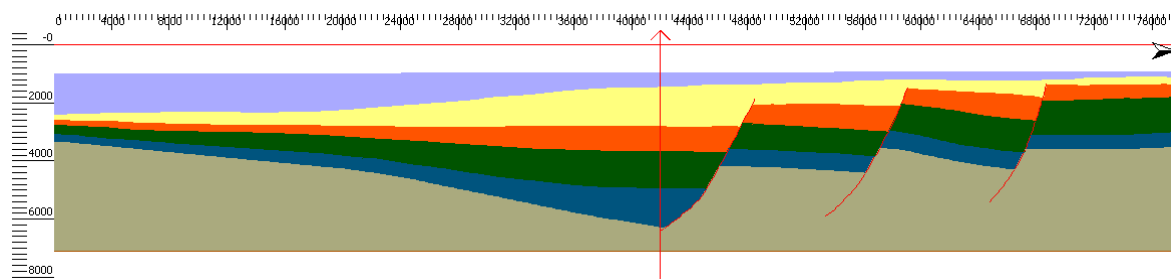


Figura 4.28 – Localização do *pin* utilizado na construção da base de dados (secção em tempo).

No cálculo da conversão em profundidade, tal como já foi referido no capítulo 2.2, é necessário conhecer a velocidade de propagação das ondas sísmicas (v) para o topo de cada horizonte e a taxa de variação dessa velocidade com o aumento da profundidade (valor k). Para as velocidades, na ausência de dados de poços, foram estipulados intervalos de valores realistas, de acordo com cada litologia (Tabela 4.1). Para o valor k , utilizou-se o valor de 0.2, de modo a inserir-se uma pequena variação da velocidade com a profundidade.

Tabela 4.1 – Valores médios das velocidades consideradas realistas, de propagação das ondas P para o topo de cada sequência sedimentar da secção.

Sequências sedimentares	Velocidades (ms^{-1})
Pós-Eurekana	1800
Sequência 1	2200
Sequência 2	2500
Sequência 3	2600
Sequência 4	3000
Pré-Eurekana	3500

No cálculo da *descompactação* foi necessário atribuir valores realistas para as porosidades iniciais (f_0) e para os coeficientes de variação da porosidade com a profundidade (coeficiente c). Como não são conhecidos estes valores para a zona em estudo nem existem dados de poços que permitam a sua determinação, então consideraram-se alguns valores típicos para os diferentes tipos de litologias, de acordo com Sclater e Christie (1980; Secção 2.3). Como existe alguma informação relativamente

ao tipo de litologias de cada sequência, é possível realizar uma estimativa realista dos valores pretendidos (Tabela 4.2).

Sabendo que a sequência pré-Eurekana e as sequências 4, 3 e 2, são compostas por uma litologia mista entre argilitos e areias, utilizaram-se os valores correspondentes a este tipo de litologia. Assim, para a porosidade inicial utilizou-se o valor de 0.56 e para o coeficiente de variação da porosidade com a profundidade, o valor de 0.39. Relativamente às sequências 1 e pré-Eurekana, dado que são compostas por argilitos, utilizaram-se os valores de 0.63 para a porosidade inicial e de 0.51 para o coeficiente de variação da porosidade com a profundidade.

Na Tabela 4.2 é apresentada a base de dados construída para a secção em estudo, tendo em conta os factores descritos anteriormente.

Tabela 4.2 – Base de dados para a secção em estudo, com as respectivas propriedades: as colunas do horizonte e da cor representam os diferentes horizontes que constituem a secção e a sua respectiva cor; os parâmetros v_0 e k representam a velocidade de propagação das ondas sísmicas para cada sequência e a sua variação com a profundidade, parâmetros utilizados na conversão em profundidade; c e f_0 correspondem aos parâmetros usados pelo algoritmo da descompactação e correspondem à variação da porosidade com a profundidade e à porosidade inicial, respectivamente; por último, a espessura apresentada corresponde à espessura da secção, em metros por segundo (pois ainda não se efectuou a conversão em profundidade), no local do *pin* utilizado na obtenção da base de dados em questão.

Horizonte	Cor	v_0 (ms^{-1})	k (s^{-1})	c (Km^{-1})	f_0 (adimensional)	Espessura (ms)
Pós_Eurekana		1800	0.2	0.39	0.56	506
Sequência 4		2200	0.2	0.39	0.56	1352
Sequência 3		2500	0.2	0.39	0.56	851
Sequência 2		2600	0.2	0.39	0.56	1287
Sequência 1		3000	0.2	0.51	0.63	1333
Pré_Eurekana		3500	0.2	0.51	0.63	813
Base		0.01	0.2	0.01	0.01	0

4.4.5. Conversão em profundidade

Antes de ser efectuada a *restauração* da secção sísmica, é necessário converte-la para profundidade (pois a secção encontra-se em tempo).

Em primeiro lugar decidiu-se qual dos dois métodos apresentados no capítulo 2.2 é o mais adequado. Como foram atribuídas velocidades aos topos das várias sequências, considerando a profundidade a que se encontram, utilizou-se o método da velocidade do horizonte.

Tendo em consideração os valores da base de dados (Tabela 4.2), utilizando o método “Horizonte” e com os polígonos seleccionados, converteu-se a secção sísmica para profundidade (Figura 4.29). A secção encontra-se agora em metros.

Para a *restauração*, considerou-se a base da secção sísmica como uma linha horizontal (linha a castanho, Figura 4.29), situada aos 16000 m de profundidade. Deste modo, ao aumentar a espessura do substrato pré-Eurekano, está-se a rectificar a sua representatividade na secção (nomeadamente quando se estiver a descompactar e a ajustar isostaticamente a secção).

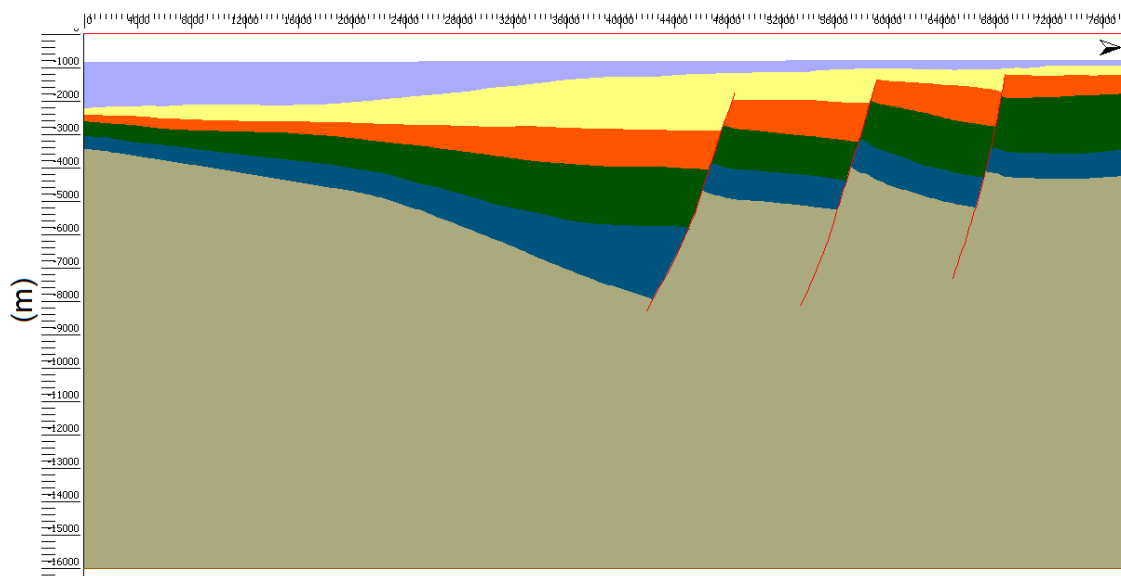


Figura 4.29 – Secção convertida em profundidade, com a escala vertical em metros.

4.5. Restauração da secção sísmica

A *restauração* da secção da Figura 4.29 será efectuada utilizando o seguinte procedimento:

- ↗ Restauração das sequências, eliminando o rejeito das falhas que as afectam;
- ↗ Restauração das sequências a um *datum*, que corresponde neste caso a uma paleo-batimetria assumida.
- ↗ Remoção das sequências superficiais (em cada fase da *restauração*), *descompactação* das sequências subjacentes e ajuste isostático;

De modo a facilitar o *backstripping* assumiu-se que a sequência 4 (a amarelo) não sofreu qualquer deformação provocada pelas falhas e que estas se moveram após a deposição das sequências 1, 2 e 3.

Como se sabe da existência de pulsos de compressão (Secção 4.1.3) após a sedimentação de algumas sequências presentes na secção sísmica, então estes serão considerados durante a *restauração*.

4.5.1. Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência pós-Eurekana

Como não se consegue observar o fundo do mar na secção, assumiu-se que a linha que define o topo da sequência pós-Eurekana corresponde ao fundo do mar na actualidade. Portanto, verifica-se que esta não se encontra deformada. Deste modo não será necessária a sua *restauração*. Assim, o primeiro passo da *restauração* da secção sísmica correspondeu à remoção da sequência pós-Eurekana (azul-acinzentada), seguindo os procedimentos descritos nos capítulos 2 e 3.

Em primeiro lugar, abriu-se a caixa de ferramentas da *descompactação*, e seleccionaram-se a linha que correspondente ao topo da secção e o polígono que compõe a sequência a remover (a azul-acinzentado). Estes objectos foram adicionados à caixa de ferramentas como “camadas topo”. Seguidamente seleccionou-se a linha existente na base da secção, adicionando-a à caixa de ferramentas da *descompactação* como “camada base”. Seleccionaram-se todos os restantes objectos que compõem a secção, adicionando-os como “camadas intermédias”. Seleccionaram-se, finalmente, as opções correspondentes à base de dados (Tabela 4.2) e à utilização de polígonos, para efectuar a *descompactação*.

Como as sequências presentes na secção sísmica apresentam variações laterais de espessura e como a secção sísmica possui mais do que 10 km de comprimento, foi necessário efectuar-se o ajuste isostático, utilizando o modelo flexural.

Assim, no separador do ajuste isostático, ainda na caixa de ferramentas da *descompactação*, seleccionou-se o modelo flexural. Utilizaram-se valores pré-definidos de 2680 kgm^{-3} , para a densidade da crosta, 3300 kgm^{-3} , para a densidade do manto, uma espessura elástica da litosfera de 15 km e um módulo de Young de $7 \times 10^{10} \text{ Pa}$, e aplicou-se o algoritmo da *descompactação* (Figura 4.30). Deste modo, a sequência pós-Eurekana foi removida da secção, as sequências subjacentes descompactadas e ajustadas isostaticamente.

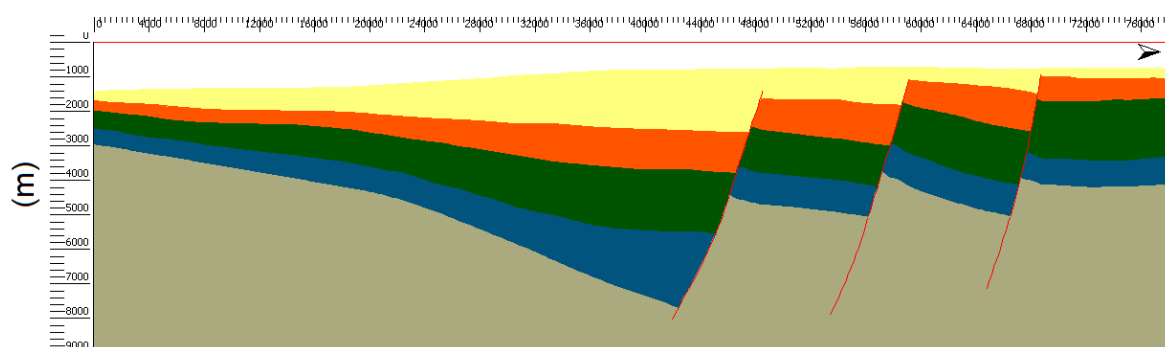


Figura 4.30 – Secção descompactada (com a sequência pós-Eurekana removida) e com o devido ajuste isostático.

4.5.2. Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 4

Como não se conhece a geometria do fundo do mar, nesta etapa da *restauração*, assumiu-se que a geometria do topo da sequência 4 (a amarelo) corresponde ao fundo do mar, no final da sua deposição. Deste modo, tal como a sequência pós-Eurekana, a sequência 4 também não foi restaurada, na medida em que não apresenta indícios de deformação.

Assim, para a remoção da sequência 4 e *descompactação* das sequências subjacentes, abriu-se a respectiva caixa de ferramentas e seleccionaram-se os objectos, do mesmo modo que se procedeu para a sequência anterior.

Após se ter removido a sequência 4, descompactado as sequências subjacentes e ajustado a secção isostaticamente, apareceram alguns artefactos localizados junto às falhas e que são devidos a estas (Secção 2.3.1). De modo a evitá-los, desfez-se a operação realizada e, tal como é explicado Secção 2.3.1, foi necessário introduzir-se um filtro flexural e voltou-se a aplicar o algoritmo. A sequência 4 foi assim removida e as sequências subjacentes descompactadas e ajustadas isostaticamente (Figura 4.31).

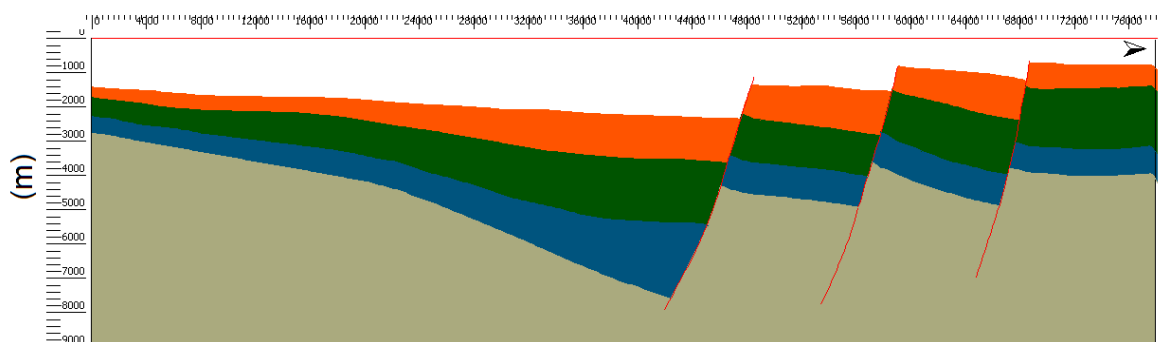


Figura 4.31 - Secção descompactada (com a sequência 4 removida) e com o devido ajuste isostático.

4.5.3. Restauração da sequência 3

Restauração das falhas

Tal como se pode observar da Figura 4.31, a sequência 3 (a laranja) encontra-se afectada por três falhas normais. Assim, o primeiro passo na *restauração* desta sequência foi eliminar o rejeito das falhas.

Nesta etapa da *restauração* foi necessário definir que algoritmo de *restauração* utilizar, para remover o rejeito das falhas que afectam as diferentes sequências sedimentares. Assim, utilizou-se o algoritmo *Fault Parallel Flow*, que assume que a movimentação das falhas se deu por deslizamento flexural (Secção 2.4.4).

Em primeiro lugar restaurou-se a falha F_1 , que se situa mais afastada da fonte de sedimentos, seguidamente procedeu-se à *restauração* da falha central, F_2 , e por último foi restaurada a falha mais a Sul, F_3 .

Abriu-se a caixa de ferramentas do algoritmo *Fault Parallel Flow*. Seleccionou-se a falha situada mais a Norte (F_1), adicionando-a ao campo de falha e estendendo-a à esquerda e à direita de modo a que atravessasse toda a secção. Depois dividiu-se a secção através da falha, para que a unidade pré-Eurekana também pudesse ser restaurada juntamente com as restantes sequências. Seleccionaram-se todos os objectos que compõem o tecto da falha, e foram adicionados como “objectos a serem movidos”. Como se utilizou o método de juntar camadas, seleccionou-se a linha à esquerda da falha F_1 de modo a adicioná-la como “tecto da falha” e seleccionou-se a linha à direita da falha, adicionando-a como “muro da falha”.

Experimentaram-se vários valores para o cisalhamento angular, de modo a obter a melhor solução de *restauração* possível. Chegou-se à conclusão que o melhor valor de cisalhamento angular seria de -1° . Assim, durante a *restauração* da sequência 3, utilizou-se este valor para o cisalhamento angular. Com todos os campos da caixa de ferramentas do *Fault Parallel Flow* devidamente preenchidos, aplicou-se o algoritmo (Figura 4.32).

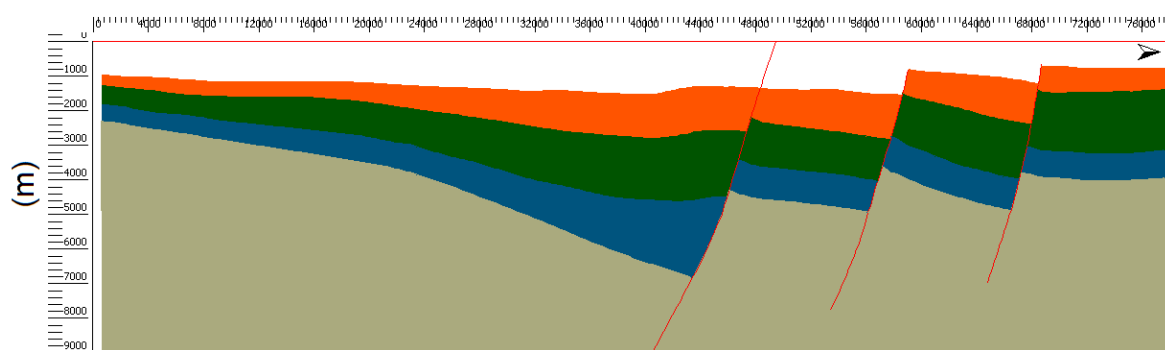


Figura 4.32 – Restauração da falha F_1 .

Utilizando agora o mesmo procedimento descrito para a falha F_1 , restauraram-se as falhas, F_2 (Figura 4.33) e F_3 (Figura 4.34).

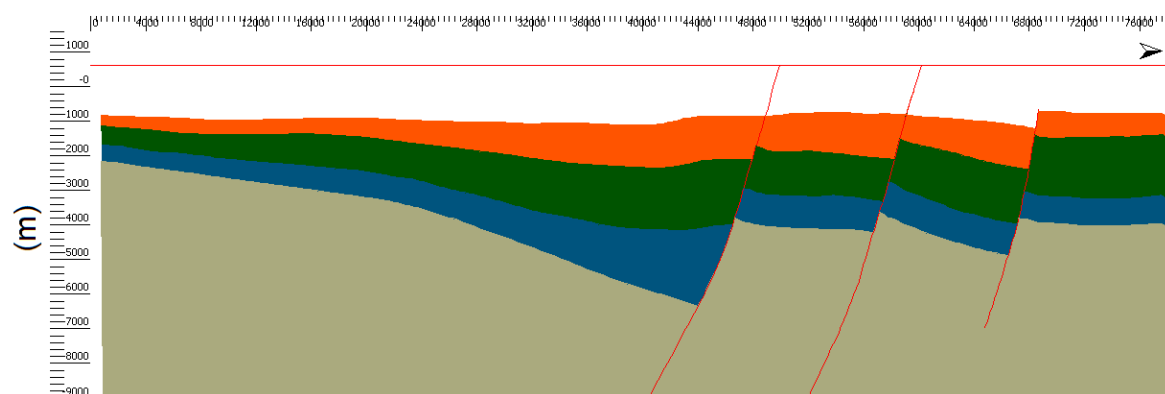


Figura 4.33 – Restauração da falha F_2 .

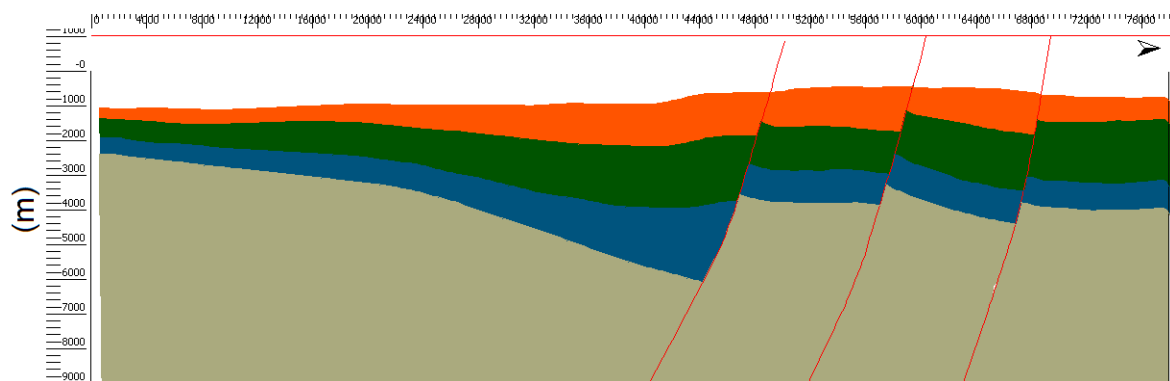


Figura 4.34 - Restauração da falha F₃.

Restauração a um datum

Como não se possuem dados relativamente à paleo-batimetria ou à profundidade do topo da sequência 3, após a sua deposição, e como se sabe da existência de uma paleo-plataforma (Figura 4.25) situada aproximadamente a meio da linha de secção sísmica, assumiu-se que a geometria do topo da sequência 3 seria equivalente ao topo da sequência 4 (linha amarela da Figura 4.35).

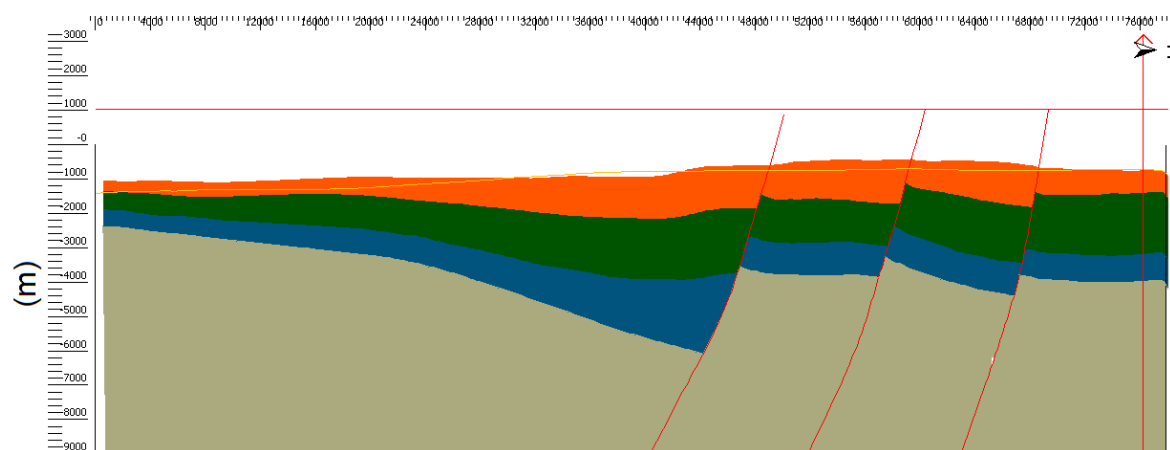


Figura 4.35 – Datum (linha amarela) utilizado na restauração da sequência 3. A seta vermelha indica a localização do pin usado na restauração.

Na definição do *datum* de referência, considerou-se que a profundidade do bloco da direita permaneceu inalterada e que ocorreu um levantamento geral da secção para Norte, associado possivelmente a um dos pulsos compressivos que ocorreu sensivelmente nesta altura (secção 4.1.3).

Depois de inserido o *datum* ao qual se irá restaurar a sequência, foi necessário definir qual o algoritmo a utilizar nesta restauração. Como nesta etapa ocorreu um pulso compressivo, utilizou-se o algoritmo *Flexural Slip Unfold*, que utiliza o deslizamento flexural, de modo a desdobrar os horizontes de interesse.

Assim, na caixa de ferramentas do *Flexural Slip Unfold*, como se pretende desdobrar a sequência a uma linha *alvo*, seleccionou-se o *datum* (linha amarela, Figura 4.35) como “linha *alvo*”, auto estendendo-o à esquerda e à direita. Seleccionaram-se as linhas que

compõem o topo da sequência 3 (a laranja), adicionando-as como “linhas *modelo*”. Os restantes objectos que compõem a secção sísmica foram definidos como “outros objectos”. Utilizando um ângulo de cisalhamento de 90°, aplicou-se o algoritmo (Figura 4.36).

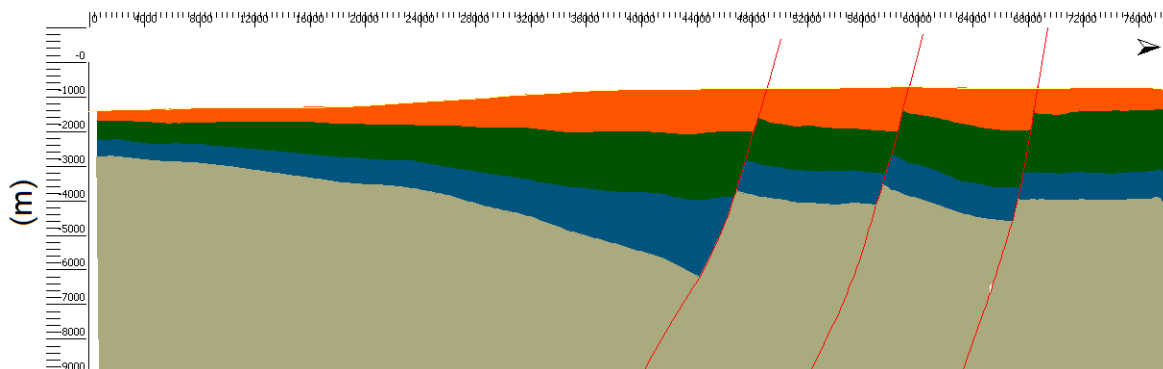


Figura 4.36 - Restauração final da sequência 3.

4.5.4. Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 3

Removeu-se a sequência 3 (laranja) e descompactaram-se as sequências subjacentes, ajustando-as isostaticamente, da mesma forma que se procedeu para as anteriores sequências (pós-Eurekana e 4; Figura 4.37).

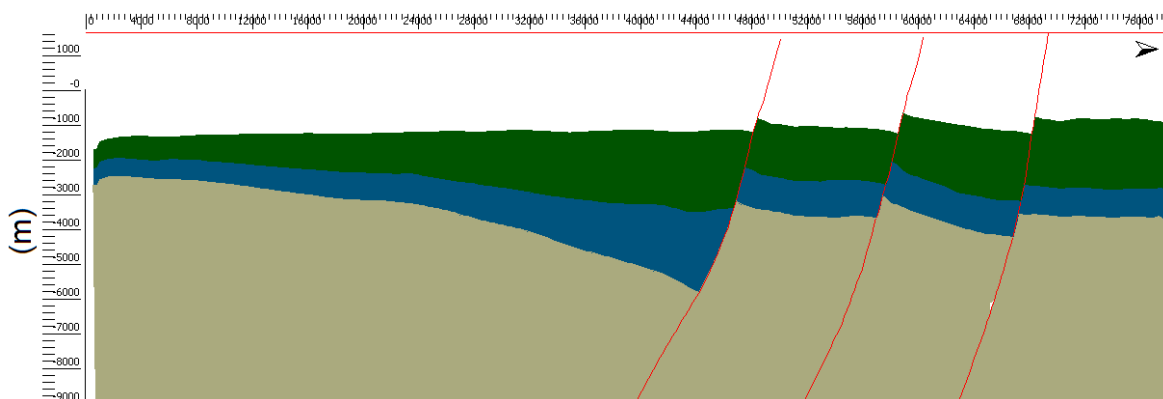


Figura 4.37 – Secção descompactada (com a sequência 3 removida) e ajustada isostaticamente.

4.5.5. Restauração da sequência 2

Restauração das falhas

Restauraram-se, de seguida, as falhas que afectam a sequência 2, utilizando a mesma metodologia usada na sequência sobrejacente (Secção 4.5.3), iniciando-se o processo pela falha F_1 (Figura 4.38). Seguidamente restaurou-se a falha F_2 (Figura 4.39) e, por último, a falha F_3 (Figura 4.40). Quando se restaurou a falha F_1 , verificou-se um ligeiro artefacto no topo das sequências do tecto da falha, que possivelmente poderá ter sido

devido à geometria da falha. Este artefacto poderia ser suavizado com uma nova interpretação da linha que define a falha F_1 , durante a construção da secção.

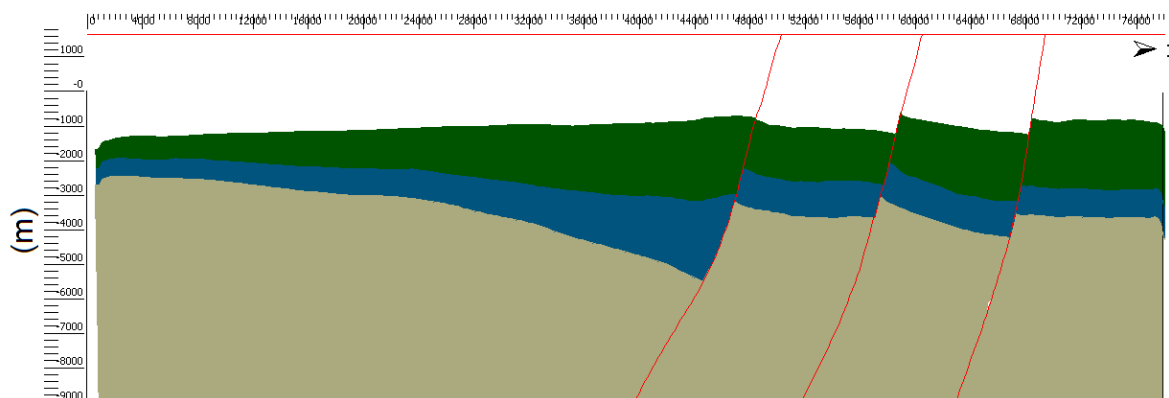


Figura 4.38 – Secção sísmica com a falha F_1 restaurada.

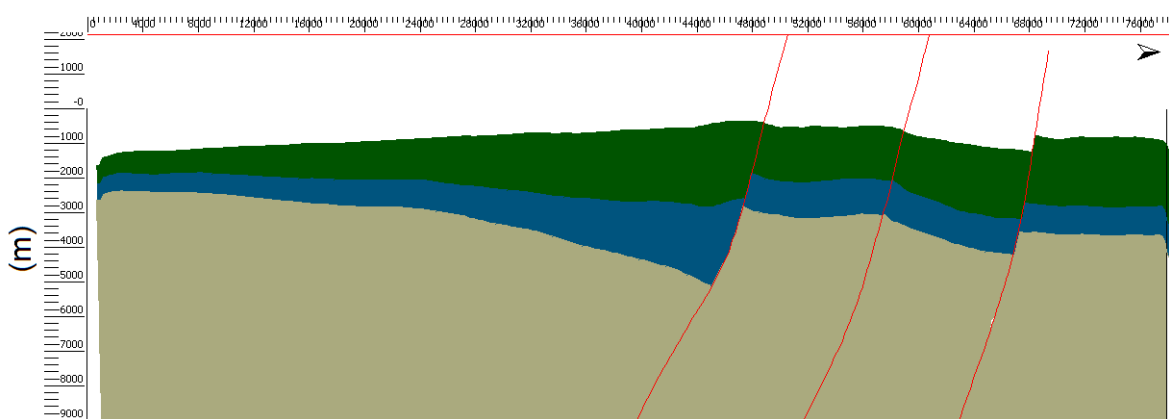


Figura 4.39 – Secção sísmica com a falha F_2 restaurada.

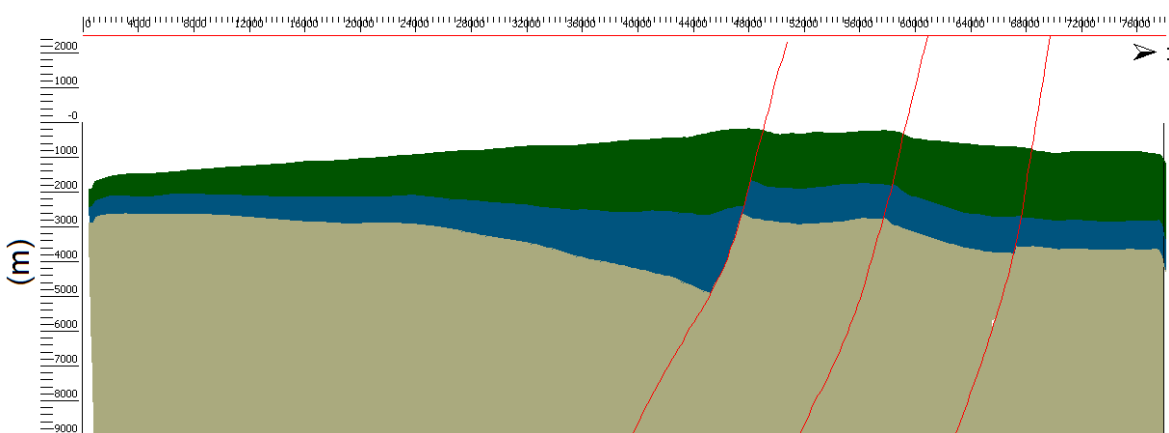


Figura 4.40 – Secção sísmica com a falha F_3 restaurada.

Como não existe qualquer informação relativamente à paleo-batimetria ou à profundidade na qual o topo da sequência se encontrava na altura em que foi depositada, comparou-se o *datum* assumido anteriormente (linha amarela, Figura 4.41), com o topo restaurado da sequência 3 (verde, Figura 4.41).

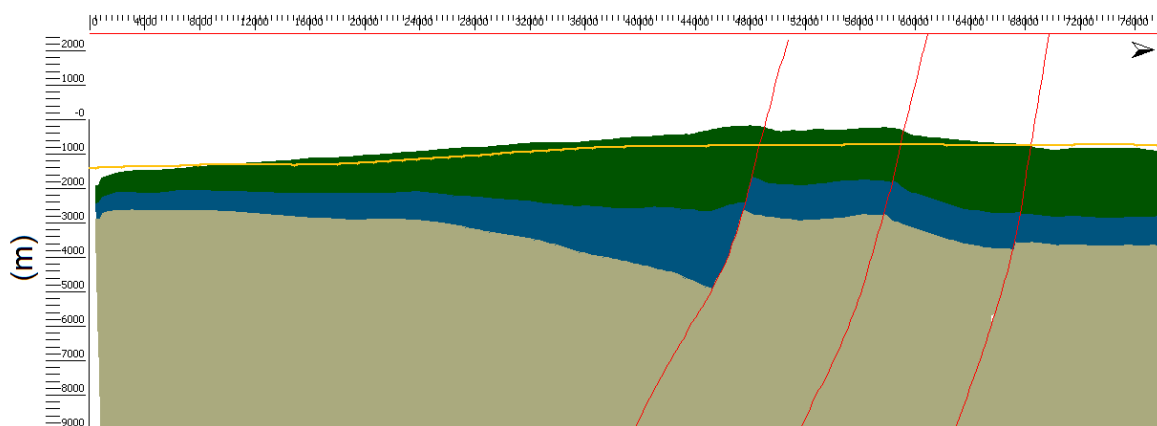


Figura 4.41 – Secção sísmica com o *datum* de *restauração* assumido anteriormente.

Comparando a geometria do topo da sequência 2 restaurada (verde, Figura 4.41) com a do topo do *datum* assumido (linha amarela, Figura 4.41), observam-se algumas variações na sua geometria. Por outro lado, de acordo com a bibliografia (Secção 4.1.3), após a deposição da sequência 2, não ocorreu um pulso compressivo (Secção 4.2.3).

De modo a perceber se as variações observadas são devidas a uma paleo-batimetria da plataforma distinta da assumida anteriormente, ou se são o resultado de um pulso compressivo não documentado na literatura (Secção 4.1.3), a partir desta fase de *restauração*, serão considerados dois cenários distintos:

- Cenário 1 – onde se restaura a secção assumindo que a geometria da sequência 2, após a sua deposição, correspondeu à sua geometria restaurada (Figura 4.41), ou seja, admite-se que não houve qualquer pulso compressivo que deformasse a sequência e, por isso, não é necessária a *restauração* ao *datum*;
- Cenário 2 – onde se restaura o topo da sequência 2 ao *datum* que corresponde ao bordo da plataforma (linha amarela, Figura 4.41). Assim, este cenário assume a existência de um pulso compressivo após a sedimentação da sequência 2.

4.5.6. Restauração da secção: Cenário 1

Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 2

Como não se efectua a *restauração* a um *datum*, a próxima etapa corresponde à descompactação e ajuste isostático da secção, pela remoção da sequência 2. Removeu-se a sequência 2, descompactaram-se as sequências subjacentes e a secção sísmica foi ajustada isostaticamente, seguindo o mesmo procedimento usado para a sequência anterior (Figura 4.42).

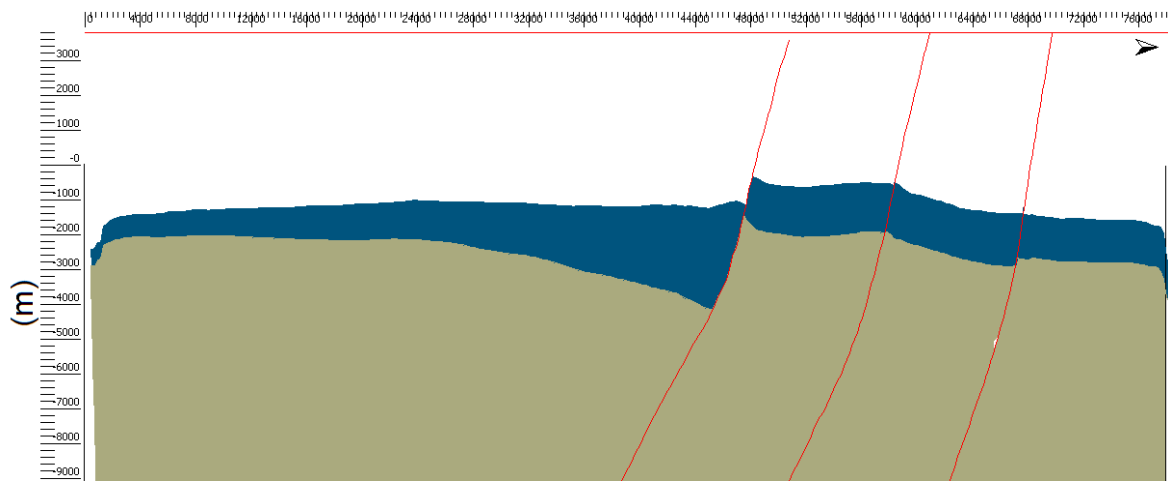


Figura 4.42 – Secção descompactada (com a sequência 2 removida), e ajustada isostaticamente (cenário 1).

Restauração da sequência 1

Restaurou-se a única falha que afecta a sequência 1, a falha F_1 , utilizando a mesma metodologia que foi usada para as sequências anteriores (Figura 4.43).

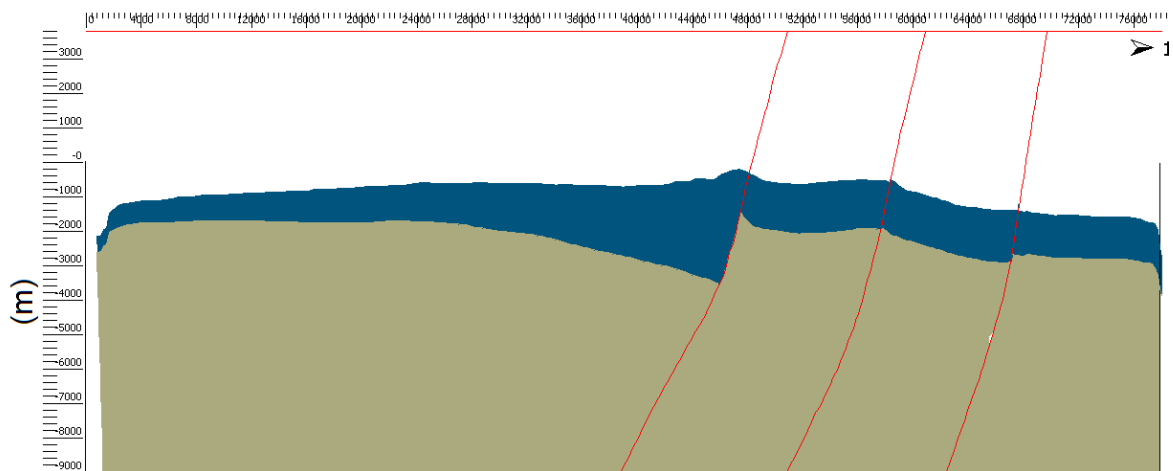


Figura 4.43 – Restauração da falha F_1 (cenário 1).

Após a deposição da sequência 1, ocorreu na região um pulso compressivo (Secção 4.2.3). Por isso, a deformação do topo da sequência 1 que se observa na Figura 4.43, pode ser atribuída a este evento tectónico, sendo necessária a *restauração* a um *datum*. O *datum* usado tem a geometria e posição do topo da sequência 4 (Figura 4.44). Na Figura 4.45 pode-se visualizar o aspecto da secção após a *restauração*.

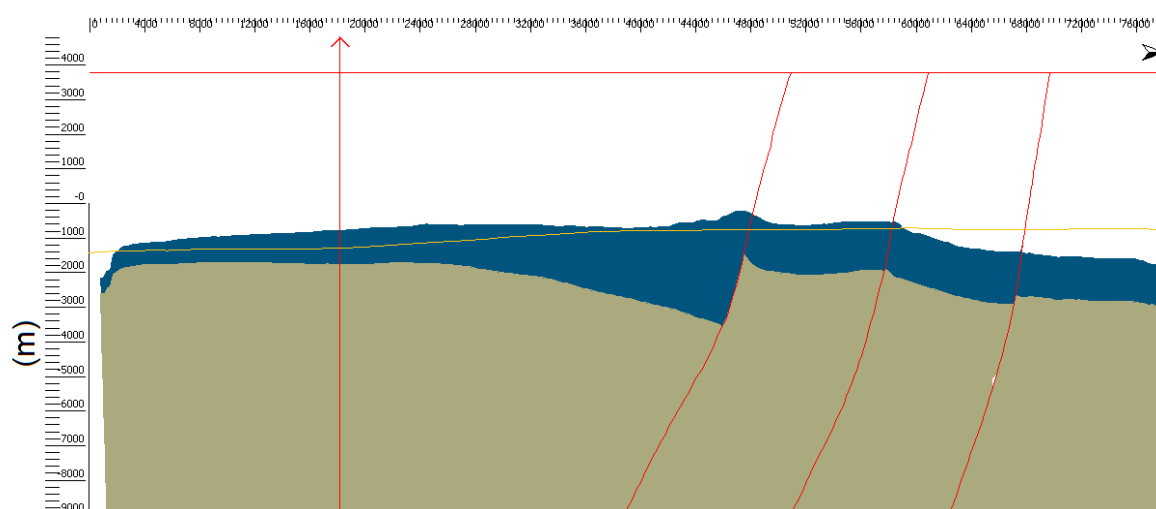


Figura 4.44 – Secção sísmica com o *datum* inserido (linha amarela) e a partir do qual será restaurada a secção (cenário 1).

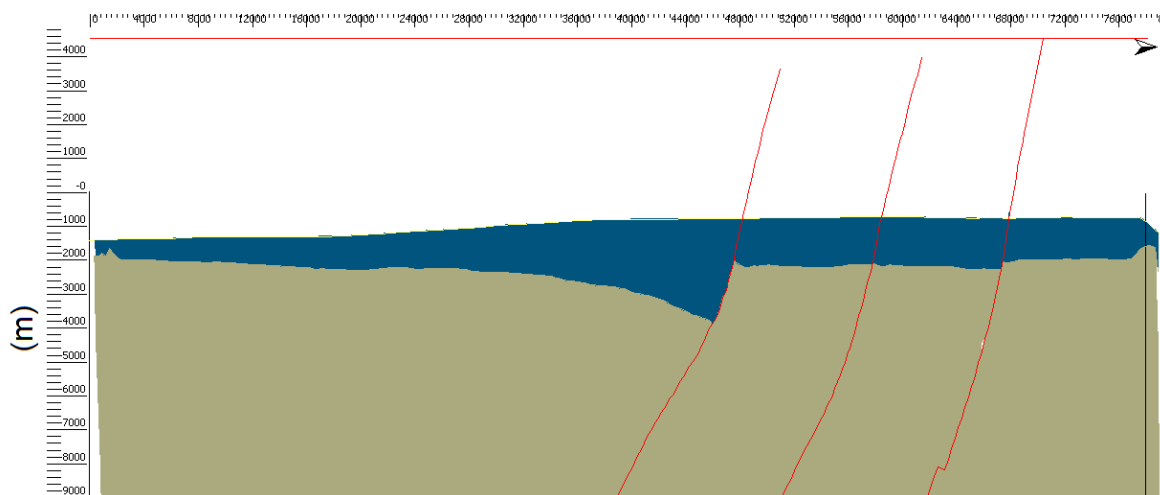


Figura 4.45 – Secção sísmica restaurada até ao *datum* criado (cenário 1).

Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 1

Removeu-se a sequência 1, descompactou-se a sequência pré-Eurekana e ajustou-se a secção sísmica isostaticamente, utilizando a mesma metodologia usada para as sequências anteriores (Figura 4.46), permitindo assim a visualização do aspecto do substrato pré-Eurekano.

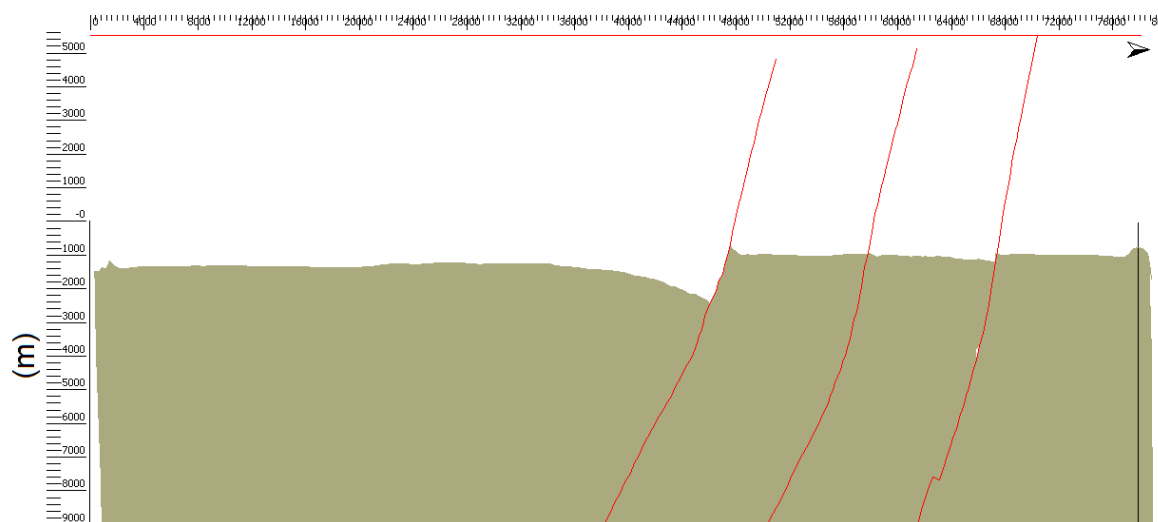


Figura 4.46 – Secção descompactada, com a sequência 1 removida e com o devido ajuste isostático (cenário 1).

Restauração da sequência pré-Eurekana

Tal como foi realizado para as sequências anteriores, restaurou-se a falha F_1 , que afecta a sequência pré-Eurekana (Figura 4.47), terminando assim, o processo de *restauração* da secção sísmica em estudo, de acordo com o cenário 1.

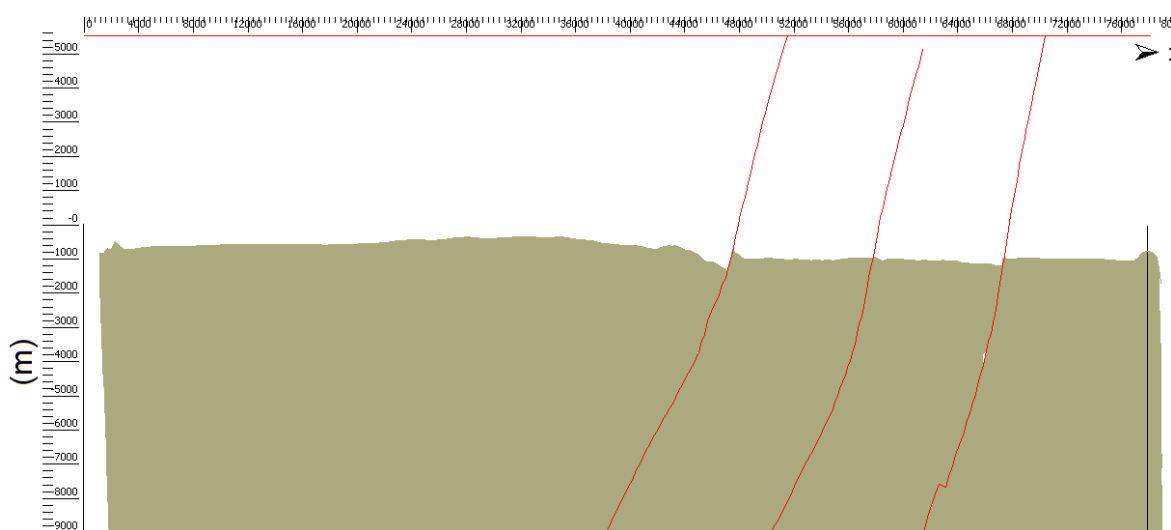


Figura 4.47 – Secção com o substrato pré-Eurekano restaurado (cenário 1).

4.5.7. Restauração da secção: Cenário 2

Restauração da sequência 2 a um datum

Considerando agora que o topo da sequência 2 (a verde) foi afectado por um pulso compressivo, restaurou-se o horizonte ao *datum* (linha amarela, Figura 4.48), tal como se realizou anteriormente para a sequência 3 (Figura 4.49).

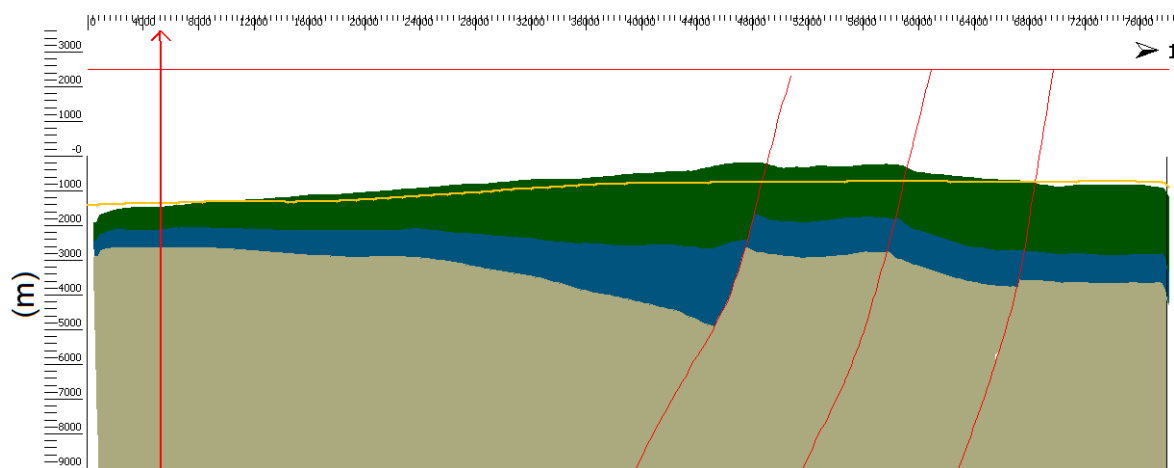


Figura 4.48 – Datum e pin inseridos para a restauração da sequência 2.

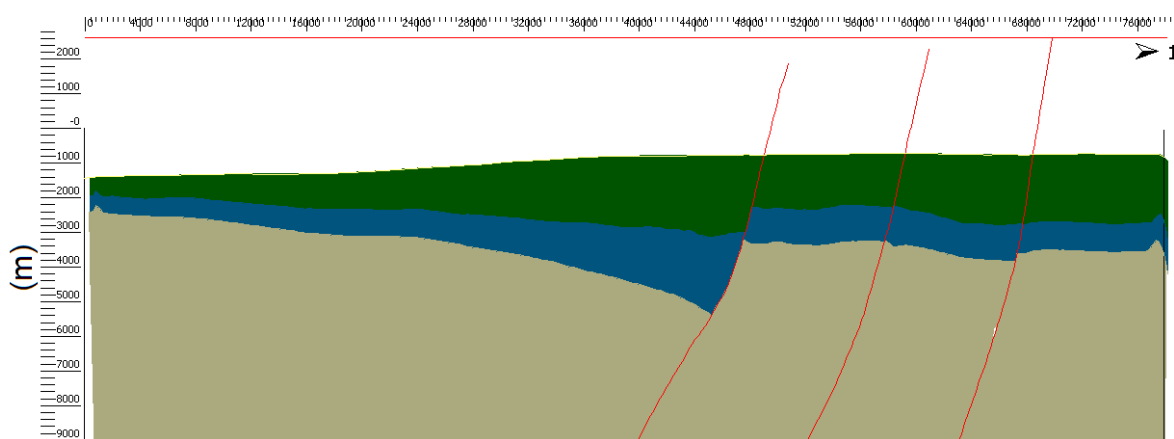


Figura 4.49 – Secção com a sequência 2 restaurada até ao datum assumido (cenário 2).

Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 2

Removeu-se a sequência 2, descompactaram-se as sequências subjacentes e a secção sísmica foi ajustada isostaticamente (Figura 4.50).

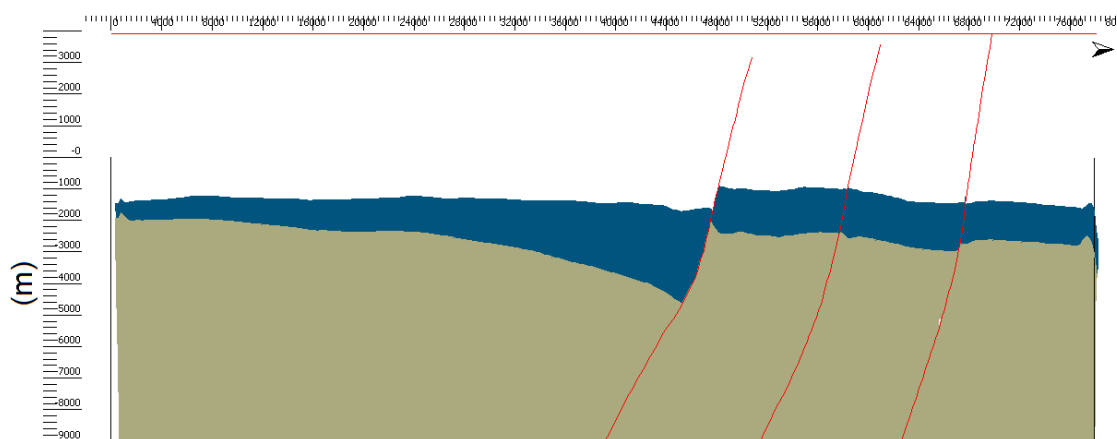


Figura 4.50 – Secção descompactada e ajustada isostaticamente, após a remoção da sequência 2 (cenário 2).

Restauração da sequência 1

Restaurou-se a única falha que afecta a sequência 1, a falha F_1 (Figura 4.51).

Como após a deposição da sequência 1, segundo a bibliografia (secção 4.1.3), está registado um pulso compressivo, restaurou-se a sequência 1 (a azul) ao *datum* apresentado na Figura 4.52. Na Figura 4.53, pode-se visualizar o aspecto da secção após a *restauração* final da sequência 1.

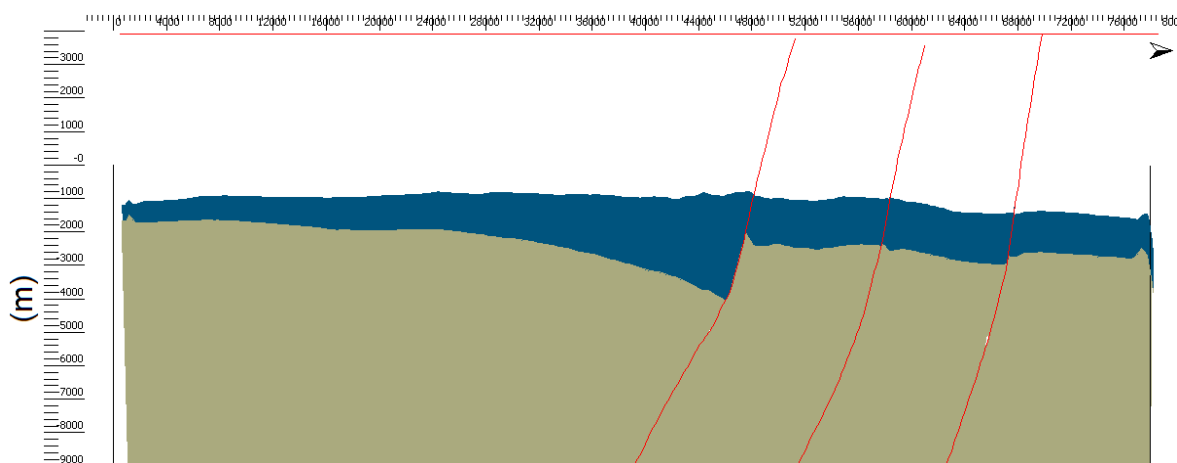


Figura 4.51 – Restauração da falha F_1 (cenário 2).

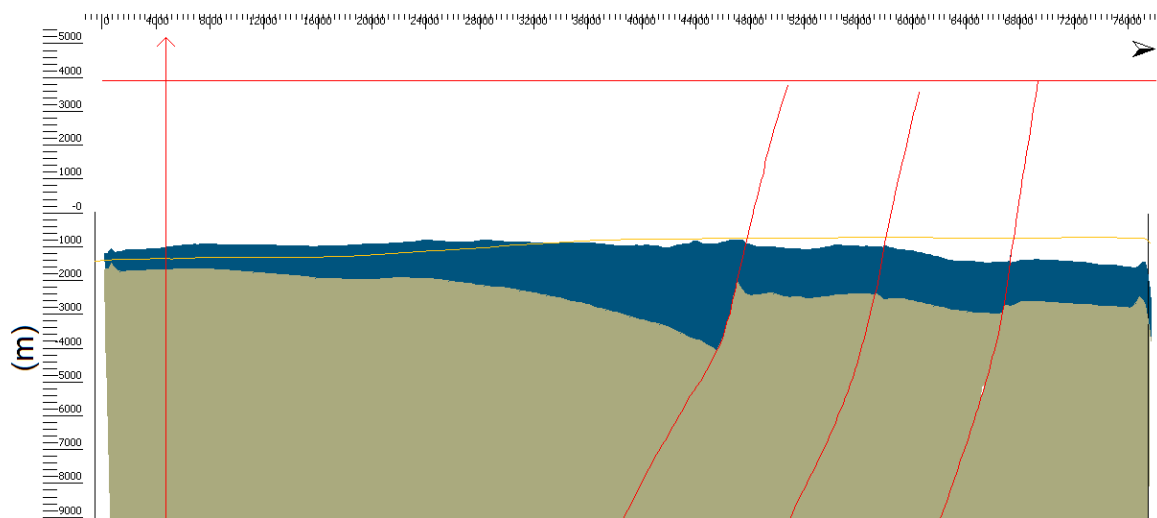


Figura 4.52 – Secção sísmica com o *datum* (linha amarela) para o qual será restaurada a secção (cenário 2).

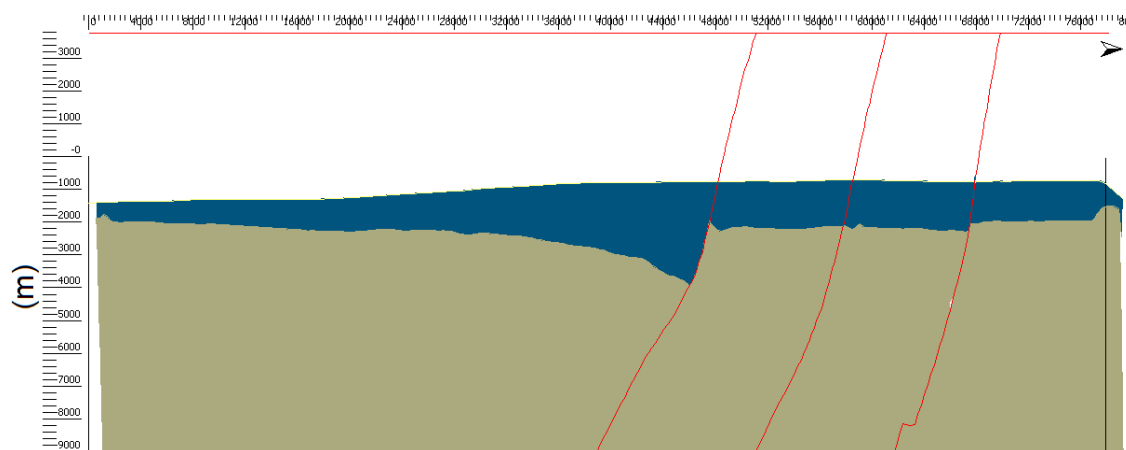


Figura 4.53 – Secção sísmica restaurada até ao datum criado (cenário 2).

Descompactação e ajuste isostático após a remoção da sequência 1

Removeu-se a sequência 1, descompactou-se a sequência pré-Eurekana e ajustou-se a secção sísmica isostaticamente, permitindo a visualização do aspecto do substrato pré-Eurekano, afectado pela falha F_1 . (Figura 4.54).

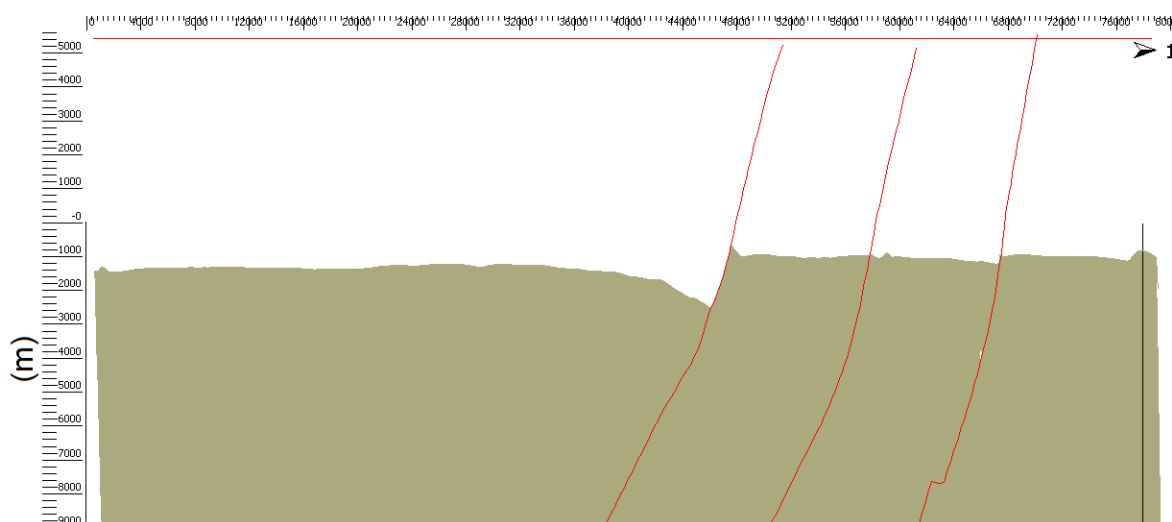


Figura 4.54 – Secção descompactada, com a sequência 1 removida e com o devido ajuste isostático.

Restauração da sequência pré-Eurekana

Restaurou-se a falha F_1 (Figura 4.55), terminando-se assim o processo de *restauração* da secção sísmica em estudo, de acordo com o cenário 2.

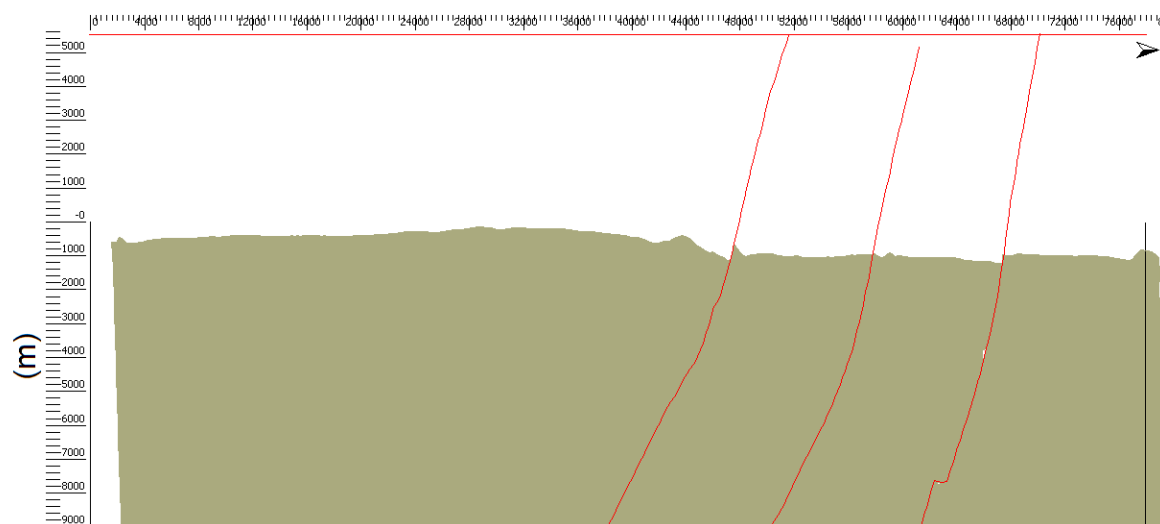


Figura 4.55 – Secção com a sequência pré-Eurekana restaurada (cenário 2).

4.6. Discussão de resultados

Admitindo que a interpretação da secção está correcta e que os valores atribuídos para os parâmetros utilizados no cálculo da conversão em profundidade, na descompactação e no ajuste isostático foram os correctos, verifica-se que a *restauração* efectuada de acordo com o cenário 2, proporciona melhores resultados no final de cada passo da *restauração*, do que os obtidos usando os pressupostos do cenário 1. No final da *restauração*, a comparação do aspecto do topo do substrato pré-Eurekano obtido em cada caso (Figuras 4.47 e 4.54) torna ainda mais evidente que os procedimentos utilizados no cenário 2 parecem ser mais adequados.

Assim, pode-se depreender que a hipótese colocada para o cenário 2 tem fundamento, isto é, parece ter existido um pulso de compressão (após a sedimentação da sequência 2) que não se encontra documentado na bibliografia consultada (Secção 4.1.3). A análise e *restauração* de outras secções sísmicas da região do Mar de Beaufort contribuiria para aportar mais dados e confirmar (ou não) esta hipótese.

Apesar de não ter sido realizado neste trabalho, uma vez concluída a *restauração*, seria possível medir a quantidade de estiramento e de encurtamento em cada etapa marcante da história geológica regional.

Ao serem realizadas várias restaurações da secção sísmica em estudo (Figura 4.10), foi ainda possível a identificação de alguns problemas pontuais na interpretação sísmica efectuada por Hubbard et al. (1985). Assim, realizaram-se alguns ajustes considerados pertinentes. Realizaram-se ajustes tanto nas linhas que definem o topo das sequências sedimentares, como nas linhas que definem as falhas, particularmente no caso da falha F_1 . Isto permitiu refinar a interpretação de modo a obterem-se resultados finais mais satisfatórios (sem artefactos que não estão relacionados com as restaurações).

Mesmo tendo efectuado alguns ajustes na interpretação da secção sísmica, ainda não foi possível reconstruir totalmente a geometria do substrato pré-Eurekano, na zona da falha F_1 . Tal poderá ter sido devido a artefactos produzidos pelo algoritmo de *restauração*, ao longo de uma superfície de falha mais irregular, devido a erros presentes na interpretação da secção sísmica.

Uma forma de tentar melhorar a *restauração*, seria, por exemplo, reinterpretar mais cuidadosamente a secção sísmica, fazer a sua *restauração* e comparar os resultados obtidos. Poder-se-ia também verificar a interpretação original da secção, através da realização de uma *restauração* em puzzle, o que permitiria identificar o grosso das possíveis incoerências na interpretação de Hubbard et al. (1985), ou confirmar a sua validade.

Capítulo 5. Conclusões

De uma forma geral os objectivos principais desta dissertação foram atingidos. Para além de se ter adquirido uma familiarização com o software 2DMove e com as suas potencialidades e aplicações, foram ainda analisados e estudados em detalhe vários exemplos de aplicações a casos reais, incluídos no tutorial do programa.

Os casos de estudo abordados permitiram, não só obter informações importantes relativamente a metodologias de restauração e ao modo de utilização dos algoritmos, como também demonstrar como é que a aplicação deste software permite resolver situações e obter resultados úteis sobre o conhecimento e evolução geológica de uma região, assim como efectuar estudos de detalhe em áreas de reservatórios de hidrocarbonetos.

Aplicou-se de seguida este programa à restauração de uma secção sísmica publicada por Hubbard et al. (1985), situada no Mar de Beaufort, a Norte do Canadá. Em primeiro lugar, efectuou-se uma revisão bibliográfica para a área de estudo, de forma a ficar a conhecer a geologia regional e a evolução geodinâmica desta zona. Esta revisão permitiu ainda correlacionar as unidades sísmo-estratigráficas da secção sísmica, descritas por Hubbard et al. (1985) como sequências 1, 2, 3, 4, com unidades crono-estratigráficas bem definidas, referidas na literatura como sequências Taglu, Richards, Kugmallit e Mackenzie Bay, respectivamente.

Efectuou-se uma análise detalhada da geometria e do carácter dos reflectores em cada unidade sísmo-estratigráfica da secção sísmica, o que permitiu evidenciar as relações entre a tectónica e a sedimentação, particularmente no que corresponde às relações temporais entre a deposição das sequências e a movimentação das falhas.

Realizou-se, por último, a restauração da secção sísmica, utilizando as metodologias e os conhecimentos adquiridos, tanto no que respeita às potencialidades das ferramentas do 2DMove, como os que resultaram do estudo dos exemplos dados pelo tutorial do programa. A restauração efectuada permitiu, além da restauração da movimentação das falhas, entrar em linha de conta com os efeitos da descompactação da secção, devidos à remoção das camadas subjacentes, e corrigir os efeitos da isostasia. Deste modo, tornou todo o processo muito mais realista do ponto de vista geológico.

Durante a utilização do software 2DMove para a restauração da secção, realizou-se uma simplificação no que respeita aos pequenos episódios de movimento sin-sedimentar nas falhas, identificados na análise sísmo-estratigráfica efectuada. Assim, foram introduzidas algumas modificações, assumindo que a movimentação das falhas ocorreu após se terem depositado as sequências sedimentares. Considera-se no entanto que estas simplificações não invalidam as conclusões obtidas.

A utilização deste programa possibilitou a reconstituição, de uma forma satisfatória, dos eventos tectónico-sedimentares nesta zona, tendo permitido a identificação dos pulsos compressivos já conhecidos para a zona em estudo, e ainda evidenciar a

existência de um possível pulso compressivo adicional, no final da deposição da sequência 2.

No âmbito desta dissertação, devido à sua limitação temporal, não foi possível utilizar todas as potencialidades do programa 2DMove e explorar exaustivamente todas as ferramentas do programa, no que respeita à restauração da secção sísmica em estudo. No entanto, e apesar de se dever considerar os resultados obtidos como apenas uma primeira aproximação, espera-se que, de alguma forma, contribuam para um melhor conhecimento da área em estudo, particularmente no que respeita à identificação de um possível pulso compressivo, no final da deposição da sequência 2.

De modo a poder-se confirmar, ou não, esta hipótese de um pulso compressivo adicional, seria necessário aplicar a metodologia utilizada a outras secções sísmicas nesta região e, se possível, testar a aplicação do software 3DMove caso exista uma cobertura de linhas sísmicas suficientemente densa que o permita.

Referências Bibliográficas

ConocoPhillips (2004). Application for approval of the development plan for Parsons Lake Field. Geology, Geophysics and Petrophysics, Section 2.1, 18pp.

Cook, F.A., Coflin, K.C., Lane, L.S., Dietrich, J.R. e Dixon, J. (1987). Structure of the southeast margin of the Beaufort-Mackenzie Basin. Arctic Canada: Geology, v. 15, 931-935.

Dietrich, J.R., Dixon, J. e McNeil, D. H. (1985). Sequence analysis and nomenclature of Upper Cretaceous to Holocene strata in the Beaufort-Mackenzie Basin: Current Research, Part A. Geological survey of Canada, Paper 85-1A., 613-628.

Dixon, J. (1995). Geological Atlas of the Beaufort-Mackenzie Area. Geological Survey of Canada, Miscellaneous Report Number 59, 173 pp.

Dixon, J., Dietrich, J.R., Osadetz, K.G., Snowdon, L.R., Dallimore, S.R. e Majorowicz, J.A. (2005). A Review of Mackenzie Delta-Beaufort Sea Petroleum Province Conventional and Non-conventional (gas hydrate) Petroleum Reserves and Undiscovered Resources: a contribution to the resource assessment of the proposed Mackenzie Delta-Beaufort Sea Marine Protected Areas. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/281345.pdf>, 25pp.

Dixon, J., Morrell, G.R., Dietrich, J.R., Taylor, G.C., Procter, R.M., Conn, R.F., Dallaire, S.M. e Christie, J.A. (1994). Petroleum Resources of the Mackenzie Delta and Beaufort Sea. Geological Survey of Canada, Bulletin 474, 52 pp.

Drummond, K.J. (2009). Tarsiut-Amauligak Fault Zone: Beaufort Sea - ultimate oil and gas resources. Yellowknife Geoscience Forum, 38pp.

Egan, S.S., Buddin, T. S., Kane, S. J. e Williams, G. D. (1997). Three-dimensional Modelling and Visualization in structural geology: New techniques for the restoration and balancing of volumes. Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological Visualization, Electronic Geology, V. 1, Paper 7, 67-82.

Embry, A.F. e Balkwill (1982). Arctic Geology and Geophysics. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 8, 552 pp.

Embry, A.F. e Dixon, J. (1990). The breakup unconformity of the Amerasia Basin, Arctic Ocean: evidence from Arctic Canada. Geological Society of America Bulletin, v. 102, 1526-1534.

Gibbs, A.D. (1983). Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. Journal of Structural Geology, 5, 153-160.

- Goguel, J. (1952). *Tectonics* (1962 translation), Freeman e Co., San Francisco, 384pp.
- Griffiths, P.A., Jones, S., Salter, N., Schaefer, F., Osfield, R. e Reiser, H. (2002). A new technique for 3-D flexural slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24, 773-782.
- Harris, David G. e Braaten, Keith M. (2004). Gas resource and supply study: a study prepared for imperial oil resources ventures limited. Mackenzie gas project, 89pp.
- Hauge, T.A. e Gray G.G. (1996). A critique of techniques for modeling normal-fault and rollover geometries. *Special Publications 99, Geological Society, London*, 89–97.
- Hossack, J.R. (1979). The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction, A review. *Journal of the Geological Society of London*, 136, 705-711.
- Hubbard, Richard J., Pape, Joe Roberts e David G. (1985). Depositional sequence mapping to illustrate the evolution of a passive continental margin. *Seismic stratigraphy II, an integrated approach, AAPG Memoir 39*, 93-114.
- Jackson, M.P.A e Vendevile, B.C. (1994). Regional extension as a geological trigger for diapirism. *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, 57-73.
- Jackson, M.P. A. e Talbot, C.J. (1986). External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. *Geological Society of America Bulletin*, v 97, 305-328.
- Kane, S.J., Williams, G.D., Buddin, T.S., Egan, S.S. e Hodgetts, D. (1997). Flexural-slip based restoration in 3D, a new approach. *AAPG, Annual Convention Official Program*, A58.
- Lane, L.S. e Dietrich, J. R. (1995). Tertiary structural evolution of the Beaufort Sea - Mackenzie Delta region. *Arctic Canada, Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 43, 293-314.
- Lane, L.S. (1997). Canada Basin, Arctic Ocean: evidence against a rotational origin. *Tectonics*, v. 16, 363-387.
- Lane, L.S. (1998). Latest Cretaceous – Tertiary tectonic evolution of northern Yukon and adjacent arctic Alaska. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, v. 82, 1353-1371.
- Lane, L.S. (2002). Tectonic evolution of the Canadian Beaufort Sea - Mackenzie Delta region, a brief review. *Geological Survey of Canada*, 49-56.
- Marsden, D. (1992). V (sub o) - K method of depth conversion. *Geophysics, The Leading Edge of Exploration*, 11 (8), 53-54.
- Mauko, G., Mukerji, T. e Dvorkia, J. (1996). *Rock Physics Handbook*. Stanford Physics Laboratory, Stanford University, 241-244.
- Morrell, G.R., et al. (1995). *Petroleum Exploration in Northern Canada: a guide to oil and gas exploration potential*. Indian and Northern Affairs Canada, 110 pp.

Morrow, D.W. (1999). Lower Paleozoic stratigraphy of northern Yukon Territory and Northwestern District of Mackenzie. Geological Survey of Canada, Bulletin 538, 202 pp.

Norris, D.K. (1997). Geology and mineral and hydrocarbon potential of northern Yukon Territory and northwestern District of Mackenzie. Geological Survey of Canada, Bulletin 422, 410 pp.

Plessman, W.von (1964). Gesteinlösung, ein Hauptfaktor beim Schieferungsprozess, Geol. Mitt. Aachen, 4, 69-82.

Ramsay, J.G. e Wood, D. S. (1973). The geometric effect of volume change during deformation process. Tectonophysics, 16, 263-277.

Rowan, M.G. e Vendeville, B.C. (2002). 3-D kinematics of minibasins and salt ridges remobilized by late contraction: physical models and seismic examples (southeast Mississippi Canyon, Gulf of Mexico) (abs). AAPG, Annual Meeting Official Program, v.11, 182-183.

Sanderson, D.J. (1976). The determination of compaction strains using quasi-cylindrical objects. Tectonophysics, 30, 25-32.

Sclater, J.G. e Christie, P. A. F. (1980). Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. Journal of Geophysical Research, v.85, Nº. B7, 3711-3739.

Seeley, Timothy e Spratt, Deborah A. (2010). Tectonostratigraphic Evolution of the Mackenzie Delta - Beaufort Sea Fold Belt. http://www.searchanddiscovery.com/documents/2010/50276seeley/ndx_seeley.pdf, 25pp.

Stephenson, R.A., Coflin, K. C., Lane, L. S., e Dietrich J. R. (1994). Crustal Structure and Tectonics of the southeastern Beaufort Sea continental margin. Tectonics, v. 13, 389-400.

Trudgill, et al. (1999). The Perdido Fold Belt, Northwestern Deep Gulf of Mexico, Part 1. Structural Geometry, Evolution and Regional Implications, AAPG Bulletin, v. 83, 88-113.

Vendeville, B.C. e Jackson, M.P.A. (1992). The rise of diapirs during thin-skinned extension. Marine Petroleum Geology, v. 9, 331-353.

Verrall, P. (1981). Structural interpretation with application to North Sea problems. Geological Society, Course Notes, Nº. 3, Lectures 13-27.

Watts, A.B. (2001). Isostasy and Flexure of the Lithosphere, 423 pp.

Withjack, M.O. e Peterson, E.T. (1993). Prediction of normal fault geometries - A sensitivity analysis. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 77, 1860-1873.

Wood, D.S. (1974). Current views of the development of slaty cleavage. Annual Review of Earth Sciences, 2, 369-401.

Xiao, H.B. e Suppe, J. (1992). Origin of rollover. AAPG Bulletin, v. 76, 509-529.


Foram ainda consultados os tutoriais e os menus de ajuda fornecidos pelo tutorial do programa Move da Midland Valley (2009).

Anexo 1

Descrição detalhada de alguns passos fundamentais que deverão ser sempre realizados, de modo a ser possível a manipulação de qualquer secção.




Inserir um mapa e associar uma secção sísmica ou geológica

Inserir o mapa:

1. Abrir a janela do 2DMove;
2. File > New Map > No;
3. File > Insert Image;
4. Seleccionar o tipo de ficheiro;
5. Escolher a imagem da secção que se pretende
6. >Open;
7. Na caixa de ferramentas "Insert Image" escolher a opção "Horizontal" para se inserir o mapa. Caso fosse uma secção, escolher-se-ia a opção "Vertical";
8. Na caixa de ferramentas ir ao separador "position" e deixar os valores pré-definidos de modo a manter a proporção da imagem original;
9. No separador "units" deixar as características pré-definidas;
10. > Apply;
11. Tools > Measure ou ícone ;
12. Medir a bala de escala do mapa;
13. Medir a largura e a altura de toda a imagem;
14. Converter os valores medidos acima para valores reais;
15. > Data > File
16. Na caixa de ferramentas do "Map Information" inserir as coordenadas X e Y da imagem do mapa, tendo em conta que o extremo inferior esquerdo é a origem e os valores determinados anteriormente no ponto 14.
17. > OK


Associar uma secção sísmica ou geológica:

1. >Create > Section Trace ou o ícone ;

2. Desenhar uma linha sobre a linha do mapa correspondente à secção pretendida;
3. *Clicar* com o botão direito do rato na linha de modo a aparecer um menu;
4. Seleccionar “View Section”.
5. > Data > File;
6. Seleccionar a opção “Tempo”;
7. Anotar as coordenadas X e Y existentes nas respectivas caixas;
8. > OK
9. > YES
10. > File > Insert Image
11. Seleccionar a imagem da secção que se pretende estudar;
12. Na caixa de ferramentas “Image Loading”, seleccionar “World Co-ordinates e inserir as coordenadas anotadas em 24;
13. >Apply;
14. Utilizando o ícone , desenhar dois pontos, em dois locais onde se conheça a escala vertical da imagem sísmica, que correspondam aproximadamente ao topo e à base da imagem;
15. Seleccionar ambos os pontos;
16. > Data > Rescale;
17. Na caixa de ferramentas “Rescale” seleccionar “section” e inserir os valores, em tempo, correspondentes aos dois pontos para o topo e para a base da imagem;
18. OK
19. Apagar os pontos criados em 31;
20. No ícone , fazer “Update Map”;
21. Escolher “Overwrite Existing Section”;
22. Voltar ao mapa, ;
23. > File > Save As de modo a guardar o mapa com a secção inserida.






Construção da secção

Delimitar a secção:

1. Seleccionar o ícone , ou ir a > Create > Post, e desenhar uma linha vertical nos extremos laterais da secção desde o topo até à sua base;

2. Desenhar duas linhas horizontais que correspondam ao topo e à base da secção;
3. Ir a Tools > Properties, *clicar* com o botão direito do rato nas linhas que delimitam a secção e escolher a opção “properties”, ou *clicar* duplamente de modo a abrir a caixa “Properties”;
4. Definir as linhas como “construction Lines”.

Desenhar a interpretação sobre a secção:

1. Ir à caixa “Line thickness” - , e seleccionar um valor para a espessura da linha;
2. Escolher uma cor, da barra de cores;
3. Ir a > Insert > Line, utilizar directamente o ícone Create Line -  ou *clicar* Ctrl+L no teclado ou alternativamente desenhar linhas usando o ícone Freehand Line - , ir a >Create >Freehand Line ou *clicar* Ctrl+F no teclado, para desenhar linhas na secção.
4. Utiliza-se o botão esquerdo do rato para criar a linha, *clicando* repetidamente conforme desejado para desenhá-la, e o botão direito do rato para terminá-la.
5. Deve-se desenhar a linha até ao final da secção, mas sem intersectá-la com outra linha.
6. Caso se pretenda desenhar os horizontes mais detalhadamente, seleccionam-se os botões de zoom existentes no 2DMove - .
7. Clica-se com o botão direito do rato na janela do 2DMove e arrasta-se o ponteiro do rato de modo a definir um rectângulo;
8. *Clicar* dentro do rectângulo, para activar o zoom.
9. Seleccionar a tecla Ctrl + / (no teclado) para visualizar novamente a imagem com o zoom inicial.
10. Utilizar a função de editar , de modo a melhorar as linhas desenhadas.


Atribuir propriedades aos objectos desenhados:

Definir as linhas de falhas como “falhas”:

1. Para seleccionar todas as falhas de uma só vez pode-se seleccionar uma só falha e ir a Edit > Select > Colour. Assim todas as falhas ficam seleccionadas.
2. Ir a Tools > Properties ou clicando com o botão direito do rato nas linhas seleccionadas e escolher a opção “properties”.


3. Na caixa de ferramentas correspondente seleccionar em “Fault”.
4. Fechar a caixa de ferramentas.
5. Para verificar que todas as falhas estão realmente assinaladas como falhas, seleccionar uma das linhas de falha e verificar na respectiva caixa de ferramentas que essa mesma falha se encontra seleccionada como “falha”.

Associar propriedades às linhas criadas:


1. Seleccionar todos os objectos que tenham a mesma cor, para isso, seleccionar um objecto e ir a >Edit > Select > Colour, ou seleccionar directamente da “Section Object List” - ;
2. Ir a >Tools > Properties, abrir directamente a caixa das propriedades clicando directamente numa linha seleccionada anteriormente, com o botão direito do rato, ou fazer directamente duplo clique no objecto seleccionado;
3. Na caixa das propriedades em “Horizon” inserir o respectivo nome que se pretender para essas linhas, e seguidamente *clicar* em “set”;
4. De modo a facilitar, quando se está a trabalhar com modelos complexos pode-se dar um nome a cada linha existente na secção;
5. Abrir a caixa das propriedades de cada linha;
6. Inserir o nome que se pretender.

Estender e terminar as linhas:

Estender e terminar as linhas tendo em conta que a extensão ou direcção de projecção dá sempre prioridade ao ângulo do horizonte nas suas extremidades.

1. Seleccionar todas as linhas da secção;
2. Ir à barra de editar e seleccionar o ícone “Tidy” - , *clicar* no teclado em Ctrl + T, ou ir a >Edit > Tidy;
3. Usar o valor pré-definido da percentagem de extensão, a menos que as linhas não fiquem completamente estendidas;
4. Verificar se as linhas ficaram bem estendidas e terminadas nos postes ou falhas.
5. Se as linhas não tiverem intersectado os postes e/ou as falhas então, retrocede-se fazendo “Undo” ou Ctrl + Z (no teclado) e tenta-se novamente aumentando a percentagem de extensão (ponto 3);
6. A operação 5 deverá ser repetida até que as linhas fiquem correctamente estendidas e terminadas;
7. Uma alternativa é seleccionar uma linha, *clicando* com o botão direito do rato, e no menu escolher “Tidy”; no entanto, com este método apenas se estende e termina a linha, no final mais próximo do cursor.

Definir um determinado intervalo de nós para cada linha:

1. Seleccionar todas as linhas, utilizando a opção >Edit > Select All ou Ctrl + A (no teclado);
2. Seleccionar o ícone “Resample” - , fazer >Edit > Sampling > Resample ou Ctrl + 2;
3. Inserir o número de intervalo de nós mínimo apropriado para a secção de modo a não alterar a forma das estruturas.
4. Para verificar as alterações ocorridas na forma da linha, é necessário copiá-la, colá-la, alterar-lhe a cor e redefinir-lhe os nós. Se a linha redefinida diferir significativamente da original, então terá que ser utilizado um intervalo de nós menor.
5. Deseleccionar os objectos com o botão direito do rato ou usando a tecla Esc do teclado;
6. Voltar a realizar esta operação antes de cada estado de *restauração* e depois de ser editado qualquer polígono ou linha, utilizando o intervalo utilizado no ponto 3.

Esta operação define um intervalo fixo ao longo do comprimento dos objectos (Figura I) de modo a corrigir nós duplicados que poderão ter sido criados durante o desenho das linhas. Embora não seja essencial, esta operação aumenta a resolução na interpretação do modelo e pode ajudar a evitar anomalias nos nós quando se está a modelar estruturas.

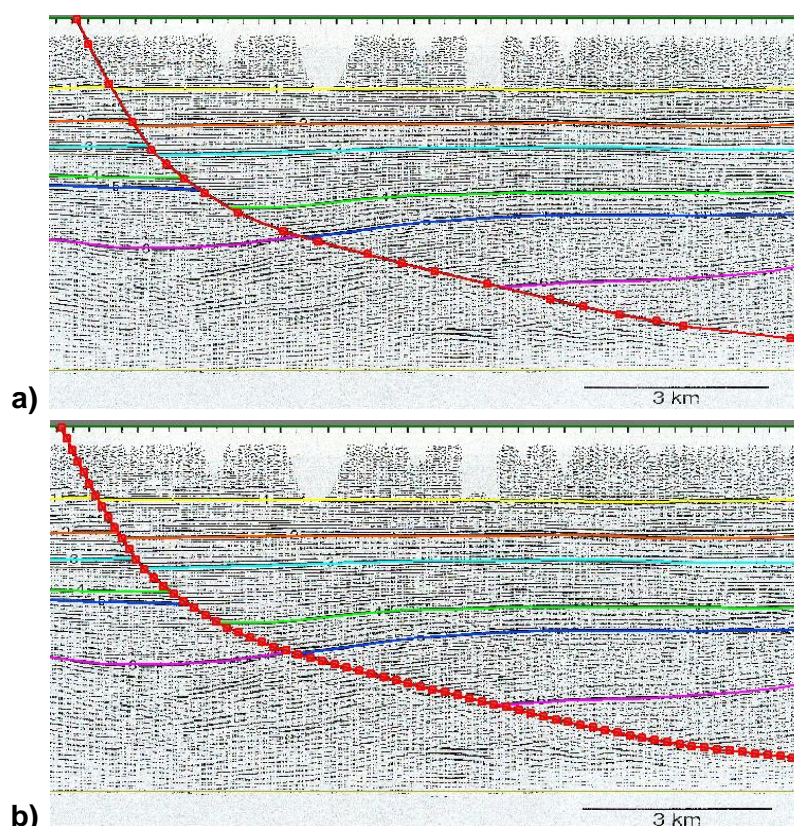




Figura I – Exemplo de uma redefinição de nós; a) uma linha sem redimensionamento; b) linha com os nós redimensionados.


Criar polígonos:

Podem-se criar polígonos automaticamente ou de forma manual.

Criar polígonos automaticamente:

1. Abrir a caixa “Seismic Restoration” -  e em “Polygons” seleccionar “Auto Create Polygons”. Alternativamente, na janela principal do 2DMove seleccionar o ícone “Auto Create Polygons” - ;
2. Verificar se todos os polígonos foram criados correctamente.
3. Apagar quaisquer polígonos que tenham sido criados incorrectamente.
4. Verificar se as linhas onde os polígonos não estão a ser criados, se encontram devidamente estendidas e terminadas e verificar todos os passos realizados na construção da secção.

Metodologia alternativa:

1. Seleccionar o topo do horizonte no qual se pretende criar o polígono;
2. Seleccionar o ícone “Auto Create Polygons” - .

Caso não se esteja a conseguir criar os polígonos automaticamente, será necessário criá-los de forma manual.

Criar polígonos manualmente:

1. Seleccionar as linhas fronteira do vazio onde se pretende criar, com a tecla Shift premida e no sentido horário ou no sentido anti-horário, como demonstra a Figura II:
 - a. Selecciona-se a linha que irá definir a cor do horizonte e que no caso da Figura II corresponde à linha verde (linha superficial);
 - b. Selecciona-se de seguida o poste lateral esquerdo;
 - c. Selecciona-se a linha que define a unidade logo abaixo, que no caso da Figura II é a linha amarela;
 - d. Selecciona-se a falha.

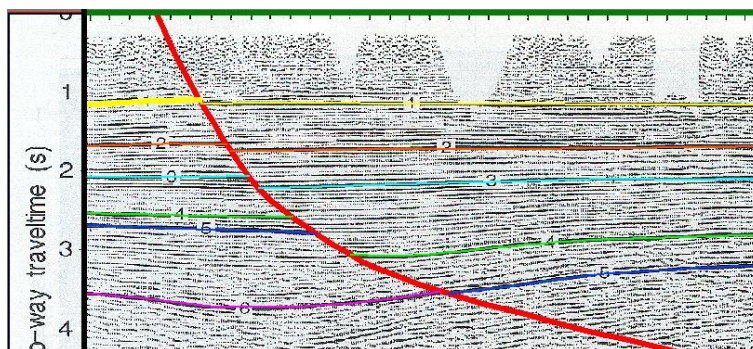



Figura II – Criar polígonos de forma manual (exemplo).

2. Quando todas as linhas de fronteira que definem o polígono que se deseja criar estiverem seleccionadas, seleccionar o ícone “Polygon” - , fazer Ctrl+K (no teclado) ou ir a Create > Polygon.

3. O polígono referente à unidade pretendida será construído.

As quatro linhas seleccionadas no ponto 1, definem a fronteira do polígono que se deseja criar. O polígono deverá ter a mesma cor que o horizonte superior; de outro modo cometeu-se algum erro, nomeadamente na selecção da primeira linha do polígono.

Caso o polígono seja delimitado por mais do que quatro linhas, ou caso seja uma forma complexa, deve-se *clicar* primeiro no botão “Create Polygon”, e depois seleccionar as linhas de fronteira. Isto irá destacar a fronteira seleccionada, permitindo intersecções exactas.


Separar linhas pelas falhas

1. Ir a “Tools” > “Split”;
2. Adicionar as novas linhas que se pretendem separar à caixa “Objects to be Split”;
3. Adicionar o objecto pelo qual se quer cortar os objectos em 2 (normalmente uma falha) à caixa: “Split Objects using line”;
4. *Clicar* “Apply”.

Esta operação pode também ser realizada seleccionando a opção “split section”:

1. Seleccionar as falhas pretendidas;
2. *Clicar* com o botão direito do rato;
3. Escolher a opção “Split Section” do menu.

Inserir um *pin*

1. Utilizar o ícone “Create Pin” -  ou ir a Create > Pin;
2. Desenhar o *pin* na secção.